

RAFAEL CORREIA DE FREITAS

**ANÁLISE ESTRUTURAL MULTITEMÁTICA DO SISTEMA PETROLÍFERO
IRATI-RIO BONITO, BACIA DO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná

Orientador Prof Dr Sídney Pires Rostirolla

Co-orientadores Prof Dr Francisco José Fonseca Ferreira
Prof Dr Augustinho Rigoti

Colaborador Prof MSc Fernando Mancini

CURITIBA
2005

FSC / MUFPR
DOAÇÃO: DO AUTOR
R\$ 20,00
18/10/05

PRO0115756-4

UFPR - Sistema de Bibliotecas

BL/MUFPR - MEMORIA DA UNIVERSIDADE F DO PARANA
AUTOR
R\$ 20,00 - Doacao
Termo no 558/05 Registro 379,827
21/10/2005

Freitas, Rafael Correia de

Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero Irati-Rio
Bonito, Bacia do Paraná / Rafael Correia de Freitas - Curitiba, 2005
116 f il

Orientador Prof Dr Sidnei Pires Rostirolla

Co-orientadores Prof Dr Francisco Jose Fonseca Ferreira

Prof Dr Augustinho Rigoti

Dissertação (Dissertação) – Setor de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná

Inclui Bibliografia

1 Geologia estrutural 2 Sensoriamento remoto 3 Lineamentos
4 Métodos geofísicos 5 Bacia do Paraná I Rostirolla, Sidnei Pires
II Ferreira, Francisco Jose Fonseca III Rigoti, Augustinho IV Título
V Universidade Federal do Paraná

CDD 551 8

TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL CORREIA DE FREITAS

**"ANÁLISE ESTRUTURAL MULTITEMÁTICA DO SISTEMA
PETROLÍFERO IRATI-RIO BONITO, BACIA DO PARANÁ"**

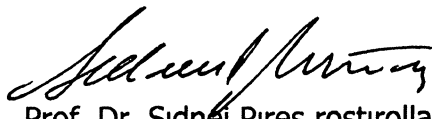
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:



Prof. Dr. Hans Dirk Ebert
Universidade Estadual Paulista



Prof. Dr. Eduardo Salamuni
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 22 de Agosto de 2005

A-PDF MERGER DEMO

À família, em toda sua extensão e significado.

I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me.

Isaac Newton

Pour juger le monde, il faut le voir de loin et l'avoir beaucoup vu de près.

François de La Rochefoucauld

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE EQUAÇÕES	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 OBJETO DE ESTUDO	3
2.1 SISTEMA PETROLÍFERO IRATI-RIO BONITO	7
2.2 LOCALIZAÇÃO, GEOLOGIA E ASPECTOS FISIOGRAFICOS	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 DADOS CARTOGRAFADOS	22
3.2 TRAÇADO DE LINEAMENTOS A PARTIR DE SENSORES DE SUPERFÍCIE	23
3.2.1 Obtenção dos lineamentos a partir do sensor LANDSAT7 ETM+	25
3.2.2 Obtenção de lineamentos a partir do MDE SRTM90	27
3.3 EXTRAÇÃO DE DRENAGENS A PARTIR DO MODELO SRTM90	29
3.4 PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS POTENCIAIS	32
3.4.1 Dados gravimétricos	32
Análise exploratória dos dados	33
Análise geoestatística para os dados <i>free-air</i>	33
Análise geoestatística para os dados Bouguer	37
3.4.2 Dados magnetométricos	41
Processamentos executados	41
3.5 LEVANTAMENTOS DE DADOS DE CAMPO	44
4 IMPLEMENTAÇÃO DE APLICATIVOS	45
4.1 AUXÍLIO COMPUTACIONAL À ANÁLISE DE LINEAMENTOS	45
4.1.1 Revisão de alguns conceitos	46
4.1.2 Alguns parâmetros passíveis de análise em modelos bidimensionais	46
4.1.3 Modelos analíticos	49
4.1.4 Métodos de análise fractal	51
4.1.5 Processamento Numérico	53

4.1.6 O Programa computacional <i>LinAnalyst</i>	55
4.2 APLICATIVO PARA DETERMINAÇÃO DE PALEOTENSÕES PELO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB	59
4.2.1 Critério de determinação de tensões	59
4.2.2 Desenvolvimento matemático	60
4.2.3 O aplicativo <i>Sigmas</i>	61
5 ANÁLISE DOS DADOS	63
5.1 ANÁLISE DOS LINEAMENTOS OBTIDOS A PARTIR DOS SENSORES DE SUPERFÍCIE	63
5.1.1 Análise direcional regional	63
5.1.2 Análise de lineamentos com auxílio de <i>buffers</i>	69
5.1.3 Análise de atributos dos lineamentos	75
5.1.4 Análises utilizando dimensão fractal	78
5.2 ANÁLISE DOS DADOS GEOFÍSICOS POTENCIAIS	81
5.3 LEVANTAMENTOS DE CAMPO	85
5.3.1 Análise descritiva e cinemática	85
5.3.2 Análise dinâmica	92
5.4 ANÁLISE INTEGRADA	94
6 IMPLICAÇÕES DAS ANÁLISES EXECUTADAS NO SP I-RB	99
7 CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS	109

ANEXO 1 – Lineamentos Traçados

ANEXO 2 – Mapas Gravimétricos, Magnetométricos e Interpretação

ANEXO 3 – CD (Aplicativos, Manuais e *Scripts*)

ANEXO 4 – Carta Operacional do Aplicativo *LinAnalyst*

ANEXO 5 – Mapas de Atributos de Lineamentos

ANEXO 6 – Mapa Lito-Estrutural da Área de Estudo

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sidnei Rostirolla, pela orientação exata, pelas discussões enriquecedoras, pela prontidão em auxiliar, e, pela convivência harmoniosa e sincera destes últimos quatro anos.

Ao professor Fernando “DaLata” Mancini, pelos inúmeros esclarecimentos, conselhos e dicas, indicando as apropriadas direções acadêmicas e científicas.

Aos professores, co-orientadores, Francisco “Chico” Ferreira e Augustinho Rigoti, pelos preciosos ensinamentos e discussões acerca do “mundo” da geofísica.

Aos colegas de “Nepal”, Bárbara e Fernando “Gaúcho”, pela constante disponibilidade em discutir os múltiplos aspectos da geologia e pela sempre tranqüila e amical convivência.

Aos colegas de pós-graduação Brunetta, Ary, Cris, Bartoszeck, Adri, Mezzomo, Lu, Fabinho, Ronaldo, Tiago, Isa e Ernesto, pelo convívio acadêmico e pessoal.

A todas as pessoas que, direta e indiretamente, auxiliaram na conclusão deste trabalho.

À UFPR, por todo apoio institucional.

À Petrobrás (via Projeto Paleozóico) e à Capes pelas concessões de bolsa.

RESUMO

Características associadas a aspectos como rotas de migração, zonas de convergência e barreiras para fluxos, integridade da seção selante, entre outras, podem ser avaliadas com o detalhamento de informações estruturais, obtidas por sensores remotos e dados levantados em campo. O objetivo principal deste trabalho reside na análise de geometrias de estruturas e suas possíveis relações com aspectos associados ao Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, na Bacia do Paraná, em área de estudo situada entre os estados do Paraná e Santa Catarina. Foram observadas estruturas com o uso de imagens de satélite, modelos digitais de elevação e imagens de sensores geofísicos potenciais, as quais, posteriormente, foram ponderadas através de técnicas específicas de geoprocessamento. Aspectos, relacionados ao detalhamento de estilos estruturais, cinemáticos e dinâmicos, foram observados com levantamentos de dados de campo em áreas-chave.

Diversas técnicas, observadas em literatura correlata, pertinentes a análises de feições estruturais lineares, foram revisadas e posteriormente implementadas por meio de programação computacional. Métodos de análise, desde técnicas simples de contagem de lineamentos, até o uso da dimensão fractal, estão detalhadamente discutidos no trabalho. Através da implementação de um aplicativo focado à análise de lineamentos, feições obtidas a partir de interpretações com os sensores remotos Landsat7 ETM e SRTM90 foram criteriosamente estudadas por métodos diversos. Da mesma forma, dados geofísicos dos campos potenciais, gravimétrico e magnético, foram usados na observação e detalhamento do arcabouço estrutural da área em foco. Para a determinação de paleotensões, a partir de dados de estrias e degraus em falhas, foi desenvolvido um aplicativo baseado no critério de Mohr-Coulomb. Este se mostrou bastante eficiente, principalmente devido à sua característica de permitir analisar as estruturas individualmente. Através da indicação das tensões máxima, intermediária e mínima, para cada falha, pode-se observar, de maneira integrada, o comportamento de estruturas geradas em eventos distintos. Tal particularidade é especialmente importante em regiões submetidas a episódios tectônicos recorrentes, caso da Bacia do Paraná.

As relações entre feições de diferentes ordens grandeza e níveis estruturais distintos, observadas mediante o emprego e integração de sensores diversos, permitiram a compreensão de elementos relativos ao envelopamento estrutural da área de estudo. A partir da análise de feições estruturais mapeadas, foram apontados controles de acumulações, tais como o potencial de geração de armadilhas para acumulações próximas a zonas de interseção de grandes estruturas regionais e também a possibilidade de maior integridade da seção selante em estruturas vinculadas a elementos regionais de direção NE-SW. Ainda, aponta-se para a possibilidade de feições estruturais, de direção N-S, com características distensionais, estarem relacionadas à ruptura da seção superior da bacia e perda de acumulações por escape de fluídos.

ABSTRACT

Structural features associated with aspects like migration routes, fluid convergence and/or barriers and seal integrity, among others, may be evaluated from information obtained by remote sensing and field data. The focus of this work is the analysis of tectonic structures geometry and their relationship with essential elements of the Irati-Rio Bonito Petroleum System, inserted in the Paraná Basin, Brazil. The structural framework was outlined with satellite imagery, digital elevation models and geophysical maps. Afterwards, the observed structures were evaluated with geoprocessing techniques. The description of structural styles, and kinematics & dynamic analysis were made using field data obtained in key-areas.

Several techniques relative to lineament analysis were reviewed and implemented in a software. Analytical methods based on object-oriented programming were applied, including ordinary lineament counting and quantification of fractal dimension. With the use of this developed software, focused in lineament analysis, the linear features interpreted on Landsat7 imagery and SRTM90 dataset were studied by various methods. Gravimetric and magnetic data were used in analysis and detailing of the geophysical framework of the selected study area. In order to calculate paleostress components, another software was developed. It computes for each fault maximum, intermediary and minor stress based on Mohr-Coulomb criteria. The positioning from stress components was done, for each single fault, with the stress field being defined to all structures of the same event, in order to discriminate the recurrent tectonic events that occurred in Paraná Basin.

The relationships between features with different orders of magnitude and structural levels, interpreted with the integration of several remote sensors, allowed the understanding of the structural envelopment in studied area. Based on the mapped structural elements, some accumulation controls were pointed, as potential for structural traps formation near of regional structures and the possibility of greater integrity of seals associated with NE-SW structural trends. Further, elements with N-S trends, generated in extensional regime, could be associated with the rupture of upper section and related fluid leak.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização das principais bacias meridionais da América do Sul, elementos estruturais associados e indicação aproximada da área de estudo.	3
Figura 2.2 – Coluna crono-litoestratigráfica da Bacia do Paraná.	4
Figura 2.3 – Mapas regionais de lineamentos estruturais	6
Figura 2.4 – Delimitação geográfica e estratigráfica de um sistema petrolífero.	8
Figura 2.5 – Eventos mostrando os elementos e processos dos sistemas petrolíferos permianos na Bacia do Paraná	9
Figura 2.6 – Mapas de favorabilidade para prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná.	10
Figura 2.7 – A) Distribuição do volume da migração de hidrocarbonetos devido ao efeito térmico da intrusão de rochas ígneas na Formação Irati - Membro Assistência; B) Correlação com as estruturas regionais	11
Figura 2.8 – Localização aproximada da área de estudo em duas reconstruções do embasamento da bacia.	12
Figura 2.9 – Localização da área de estudo e mosaico das cartas topográficas relacionadas	13
Figura 2.10 – Mapa geológico simplificado da área estudada	14
Figura 2.11 – Mapa hipsométrico e relevo sombreado	15
Figura 2.12 – Aspecto do segundo planalto na área estudada.	16
Figura 2.13 – Aspecto do Terceiro Planalto na área estudada.	17
Figura 2.14 – Mapa de declividade.	18
Figura 2.15 – Mapa de drenagens da área estudada	19
Figura 2.16 – Mapa de aspecto ou direção de fluxo	20
Figura 2.17 – Diagramas indicando proporção entre as classes de direção de fluxo.	21
Figura 3.1 – Aspecto do mapa geológico integrado.	23
Figura 3.2 – Aspecto dos lineamentos obtidos com os sensores indicados e comportamento direcional.	24
Figura 3.3 – Mosaico das imagens LANDSAT7 ETM+ utilizadas.	25
Figura 3.4 – Aspectos da imagem LANDSAT7 com diferentes técnicas de visualização.	27
Figura 3.5 – Esquema para geração de anaglifos	29
Figura 3.6 – Algumas visualizações adotadas para o modelo SRTM90.	30
Figura 3.7 - Extração automatizada de drenagens a partir de MDE.	31
Figura 3.8 – Localização das 965 estações gravimétricas utilizadas.	32
Figura 3.9 – Alguns aspectos estatísticos dos dados <i>free-air</i> e Bouguer.	33
Figura 3.10– Verossimilhança perfilhada no parâmetro <i>lambda</i> calculada com a função <i>boxcox</i> .	34
Figura 3.11 – Indicação de dependência espacial.	35
Figura 3.12 – Semi-variogramas direcionais.	35
Figura 3.13 – Curva ajustada e envelope simulado através do modelo dos mínimos quadrados e modelo <i>Matérn</i> .	36
Figura 3.14 – Comparação das <i>krigagens</i> executadas com os dois diferentes métodos utilizados	36
Figura 3.15 – Relação dos dados obtidos pelos dois modelos utilizados.	36
Figura 3.16 – Indicação do parâmetro <i>lambda</i> a partir de transformação <i>boxcox</i> .	37
Figura 3.17 – Semi-variograma para os dados Bouguer.	37
Figura 3.18 – Semi-variogramas direcionais.	38
Figura 3.19 – Curva ajustada e envelope simulado através do modelo dos mínimos quadrados e <i>Matérn</i> .	38
Figura 3.20 – Comparação das <i>krigagens</i> executadas com os dois diferentes métodos utilizados.	38
Figura 3.21 – Relação dos dados obtidos pelos dois modelos utilizados.	39
Figura 3.22 – Mapas das anomalias <i>free-air</i> e Bouguer.	40
Figura 3.23 – Localização dos levantamentos aéreos compilados e alguns dados técnicos.	41
Figura 3.24 – Mapa Magnetométrico Residual com iluminação NW e localização da área de estudo.	42
Figura 3.25 – Continuações ascendentes e respectivos sinais analíticos.	43
Figura 3.26 – Localização dos pontos levantados.	44
Figura 4.1 – Perfis e índices de rugosidade ou JRC (<i>Joint Roughness Coefficient</i>).	48
Figura 4.2 – Caracterização numérica dos lineamentos.	49
Figura 4.3 – Círculo de amostragem.	51
Figura 4.4 – Análise utilizando o método de contagem de caixas (<i>Box-Counting</i>).	52
Figura 4.5 – Análise da dimensão fractal por linhas de busca.	53
Figura 4.6 – Segmentação de lineamentos em vetores individuais.	54
Figura 4.7 – Aspecto do programa Vector2XYCoord.	55
Figura 4.8 – Interface principal do programa LinAnalyst.	55
Figura 4.9 – Alguns métodos de análise utilizados no programa LinAnalyst.	56
Figura 4.10 - Métodos de busca para análise por contagem de caixas.	58
Figura 4.11 – Obtenção das tensões pelo critério de Mohr-Coulomb.	60

Figura 4.12 – Aspecto do aplicativo Sigmas.	62
Figura 5.1 – Diagramas de rosetas da área estudada e para os diferentes pacotes cronológicos (Landsat7).	64
Figura 5.2 – Diagramas de rosetas da área estudada e para os diferentes pacotes cronológicos (SRTM90).	65
Figura 5.3 – Mapas das rosetas de frequência e comprimento acumulados para os lineamentos obtidos com o MDE SRTM90.	66
Figura 5.4 – Mapas das rosetas de frequência e comprimento acumulados para os lineamentos obtidos com imagens Landsat7.	67
Figura 5.5 – Detalhamento de estruturas em diferentes escalas de observação.	68
Figura 5.6 – Área de análise dos <i>buffers</i> para os lineamentos de Zalán et al. (1987).	69
Figura 5.7 – Área de análise dos <i>buffers</i> para os grandes lineamentos interpretados.	69
Figura 5.8 – Diagramas de rosetas para os lineamentos SRTM90 inseridos nos <i>buffers</i> dos lineamentos de Zalán et al. (1987).	70
Figura 5.9 – Diagramas de rosetas para os lineamentos Landsat inseridos nos <i>buffers</i> dos lineamentos de Zalán et al. (1987).	71
Figura 5.10a – Diagramas de rosetas para os lineamentos SRTM90 inseridos nos <i>buffers</i> dos grandes lineamentos interpretados.	73
Figura 5.10b – Diagramas de rosetas para os lineamentos Landsat inseridos nos <i>buffers</i> dos grandes lineamentos interpretados.	74
Figura 5.11 – Modelo conceitual sintético de migração e fraturas associadas.	78
Figura 5.12 – Área de execução da análise <i>box-counting</i> e resultados plotados em diagramas log-log.	79
Figura 5.13 – Dimensão fractal por classes de comprimento.	80
Figura 5.14 - Diagramas direcionais indicando comprimento médio das linhas de busca e dimensão fractal para frequência acumulada.	80
Figura 5.15a – Sobreposição das isolinhas das anomalias Bouguer aos dados magnéticos com continuação para cima em 5000 metros.	82
Figura 5.15b – Sobreposição das isolinhas das anomalias <i>free-air</i> aos dados magnéticos com continuação para cima em 1500 metros.	83
Figura 5.16 – Modelo indicando as respostas das diferentes anomalias ao arcabouço geológico-estrutural.	83
Figura 5.17 – Correlação do mapa Bouguer e estruturas de Zalán et al. (1987).	84
Figura 5.18 – Possível feição estrutural sigmoidal observada na área de estudo. Dois modelos indicados para as geometrias observadas.	85
Figura 5.19 – Indicadores observados nas rochas básicas da Formação Serra Geral.	86
Figura 5.20 – Indicadores observados nas rochas sedimentares.	87
Figura 5.21 – Estruturas em flor positivas.	87
Figura 5.21 – Falha com rejeito vertical de aproximadamente 15 metros.	88
Figura 5.22 – Diagrama para todas as fraturas amostradas na área.	89
Figura 5.23 – Diagramas para as fraturas segundo intervalos estratigráficos.	89
Figura 5.24 – Mapa de lineamentos e diagramas das estruturas rúpteis observadas em campo.	90
Figura 5.25 – Fraturas geradas durante cisalhamento simples.	92
Figura 5.27 – Tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 calculados.	93
Figura 5.28 – Variação entre σ_1 e σ_2 .	93
Figura 5.29 – Tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 calculadas para os dados obtidos nas unidades mesozóicas e paleozóicas	94
Figura 5.30 – Isólitais de folhelhos para a Fm. Irati; Isólitais de areia para a Fm. Rio Bonito; Volume migrado de hidrocarbonetos devido ao efeito térmico da intrusão de rochas ígneas na Formação Irati.	94
Figura 5.31 – Estruturas de subsuperfície obtidas a partir dos dados geofísicos potenciais.	95
Figura 5.32 – Estruturas interpretadas a partir das imagens Landsat7 e do MDE SRTM90.	96
Figura 5.33 – Principais feições lineares observadas na área estudada	96
Figura 5.34 – Modelo para geração das fraturas N-S devido à flexura da Placa Sul-americana.	98
Figura 5.35 – Desenvolvimento de estruturas devidas à distensão da Placa Sulamericana durante o Mesozóico.	98
Figura 6.1 – Correlação das estruturas obtidas com dados geofísicos e: isólitais de folhelhos da Fm. Irati; isólitais de areia da Fm. Rio Bonito; e volume migrado de hidrocarbonetos.	100
Figura 6.2 – Correlação entre atributos de densidade e comprimento médio de estruturas.	102
Figura 6.3 – Modelos de formação de armadilhas estruturais para petróleo, concebidos a partir da análise estrutural do Alto de Quatiguá.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores dos comprimentos de ondas para cada banda do sensor LANDSAT7 ETM+	25
Tabela 3.2 – Matrizes de SOBEL para as filtragens direcionais aplicadas.	26
Tabela 3.3 – Algumas especificações dos dados SRTM.	28
Tabela 3.4 – Parâmetros para ajuste ao semi-variograma pelos métodos dos mínimos quadrados e <i>Matérn.</i> Dados <i>free-air</i> .	35
Tabela 3.5 – Parâmetros para ajuste ao semi-variograma pelos métodos dos mínimos quadrados e <i>Matérn.</i> Dados Bouguer.	37
Tabela 3.6 – Parâmetros estatísticos dos dados originais e calculados.	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 – Transformação <i>boxcox</i>	33
Equação 4.1 – Índice RQD	48
Equação 4.2 – Azimute do lineamento.	49
Equação 4.3 – Comprimento do lineamento	49
Equação 4.4 – Valor médio dos azimutes	50
Equação 4.5 – Dispersão dos azimutes	50
Equação 4.6 – Porcentagem da dispersão dos azimutes.	50
Equação 4.7 – Densidade de lineamentos.	51
Equação 4.8 – Comprimento médio de lineamentos.	51
Equação 4.9 – Intensidade de lineamentos.	51
Equação 4.10 – Relação exponencial fractal.	51
Equações 4.11 – Conversão de coordenadas polares para retangulares.	60
Equações 4.12 – Expressão matricial do produto vetorial em coordenadas retangulares.	60
Equações 4.13 – Equações obtidas a partir da aplicação da matriz do produto vetorial.	61
Equação 4.14 – Matriz de rotação.	61
Equações 4.15 – Equações obtidas a partir da aplicação da matriz de rotação.	61
Equações 4.16 – Conversão de coordenadas retangulares para polares.	61

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivos principais a apresentação de diversas técnicas de processamento, desenvolvimento, utilização e integração de dados com o uso de diferentes métodos analíticos, visando desta forma corroborar e complementar informações de diferentes escalas e origens. Com a crescente disponibilidade de dados obtidos por sensores remotos passíveis de interpretações geológico-estruturais, nota-se a necessidade de métodos que otimizem análises multitemáticas, gerando respostas que facilitem e/ou simplifiquem sua compreensão na sequência metodológica adotada. Os dados interpretados são convertidos para expressões numéricas (vetoriais) e então tratados computacionalmente através de parâmetros relativos à sua geometria. Utilizando-se técnicas estatísticas específicas, pode-se então estimar a validade dos dados obtidos e indicar, de maneira ponderada, a relação destes com a realidade geológica do local analisado.

Dados estruturais gerados por outros autores foram compilados e integrados a uma nova interpretação de dados geofísicos do campo potencial (magnetométricos e gravimétricos), associados a uma análise detalhada das estruturas observadas por sensores remotos de superfície. Desta forma obtiveram-se subsídios para uma melhor compreensão da correlação existente entre estruturas, em diferentes níveis de profundidade, na área escolhida para estudo do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito. Para este estudo foi selecionada uma área de 2° 45' (extensão leste-oeste) por 1° 30' (extensão norte-sul), completamente inserida na Bacia do Paraná, localizada entre os estados do Paraná e Santa Catarina (ver figuras 2.1, 2.9 e 2.10, para contextos continental, regional e local, respectivamente).

A compreensão dos elementos essenciais envolvidos em um sistema petrolífero é de fundamental importância para sucessos prospectivos. Os aspectos referentes a rotas de migração, integridade de selos, além da geração de armadilhas estruturais, entre outras feições, são estreitamente relacionados às estruturas da bacia estudada, e sua evolução como sistema.

O objetivo geral do trabalho consiste em desenvolver métodos apropriados para obtenção, análise, armazenamento e visualização de dados referentes a sensores remotos, de diferentes origens, para o sistema petrolífero indicado. Além da análise de dados de sensores remotos, levantamentos de campo foram executados para aquisição de informações relevantes à evolução e configuração de estruturas na porção estudada da bacia. Também foram utilizadas técnicas de programação para a geração de aplicativos auxiliares às análises estruturais aqui apresentadas. Posteriormente foram geradas cartas temáticas específicas, através de cruzamento de informações diversas.

Através da utilização de dados gravimétricos e magnetométricos, buscou-se obter respostas para uma delimitação de feições estruturais subsuperficiais da área de estudo. Já a análise de sensores remotos de superfície constitui uma ferramenta bastante útil para o reconhecimento de

características estruturais em porções aflorantes, mostrando-se um método bastante conveniente para auxílio à compreensão de diversos aspectos como direção das feições, densidade de fraturamento, comprimento e intensidade de falhas, entre outros. A correlação entre estes diversos parâmetros geométricos das estruturas, e ainda entre sensores que indicam diferentes profundidades de investigação, subsidia a compreensão destes aspectos em diferentes níveis, auxiliando desta forma a compreensão do envelopamento estrutural na área de estudo.

O envelopamento foi obtido a partir do mapeamento e interpretação das superfícies envoltórias da seção estudada. Como superfícies envoltórias foram designadas a interface embasamento/bacia na base e a superfície erosiva (fisiografia atual) no topo. Alternativamente, podem-se utilizar diferentes superfícies erosivas correlatas a episódios distintos na evolução da bacia. Neste modelo estas diferentes superfícies representam, temporalmente, a evolução tectônica e sedimentar da seção.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No desenvolvimento do texto, no capítulo 2 é demonstrada uma síntese dos aspectos geológico-estruturais visando embasar os estudos desenvolvidos. São também discutidos trabalhos referentes à potencialidade para geração/acumulação de hidrocarbonetos no sistema petrolífero e sua importância na seleção da área de estudo.

Posteriormente, no capítulo 3, são indicados os materiais e métodos usados nos processamentos das diversas fontes de dados utilizadas durante o trabalho. Os métodos, bem como a revisão de diversas técnicas analíticas utilizadas para o desenvolvimento de dois aplicativos, implementados para auxílio à análise estrutural aqui executada, encontram-se detalhados no capítulo 4.

O capítulo 5 é consagrado à análise estrutural propriamente dita. Os dados são analisados, em um primeiro momento, em grupos distintos, e, posteriormente, é executada uma integração dos resultados obtidos com as diferentes ferramentas. A dissertação encerra-se com uma discussão sobre as implicações dos dados analisados, individualmente e integrados, no potencial de geração e acumulação para o Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito.

2 OBJETO DE ESTUDO

A Bacia do Paraná, local onde se insere o Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito (SP I-RB), é uma bacia intracratônica, de formato ovalado e alongada na direção NNE-SSW. Apresenta distribuição em área de aproximadamente 1.600.000 km² e localiza-se na porção meridional do continente sul-americano (Figura 2.1). Suas rochas, sedimentares e vulcânicas, têm idades compreendidas entre os períodos Siluro-Ordoviciano e Cretáceo, atingindo espessura máxima de aproximadamente 6000 metros (Zalán et al, 1990; Milani e Thomaz Filho, 2000).

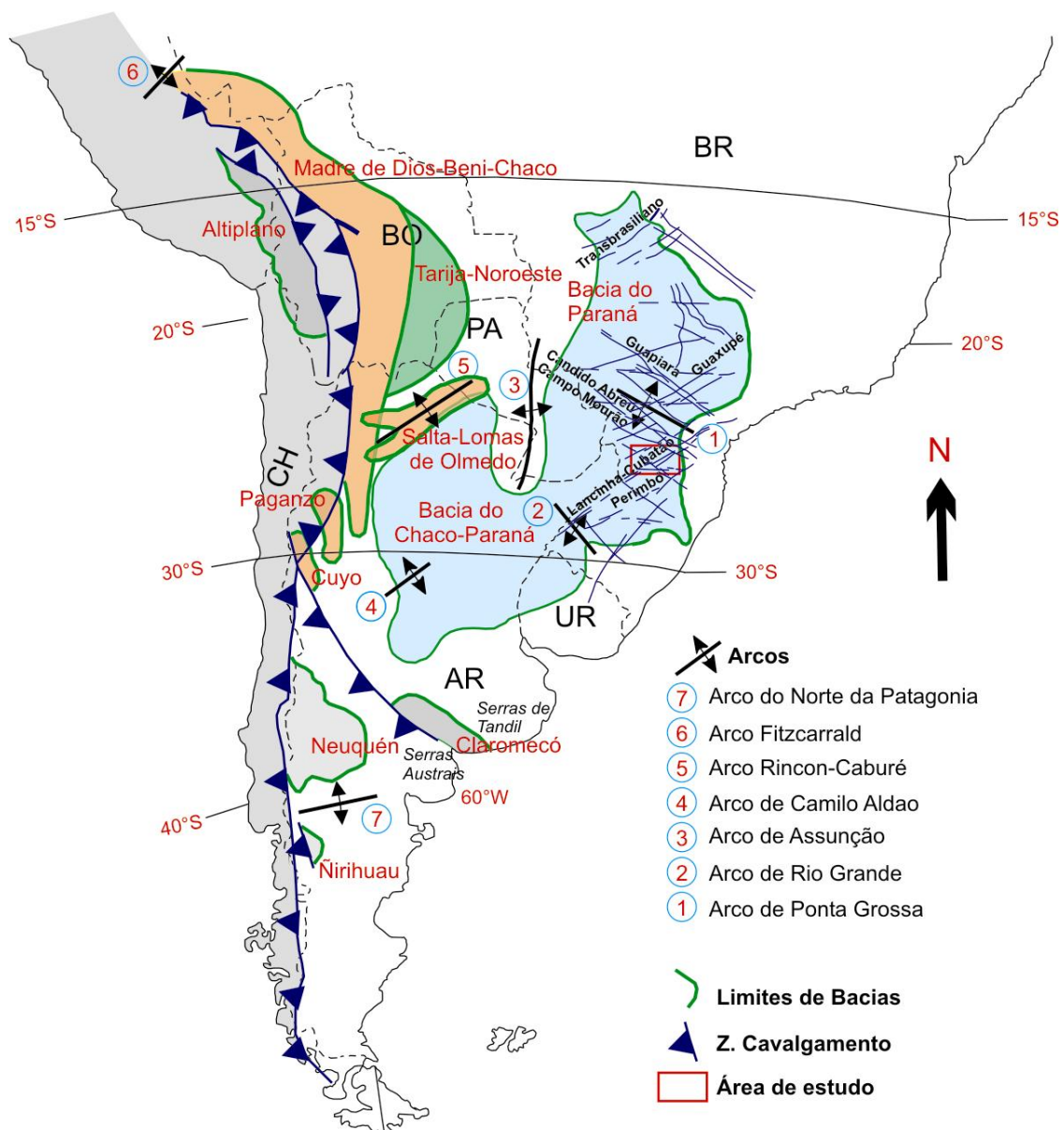


Figura 2.1 – Localização das principais bacias meridionais da América do Sul, elementos estruturais associados e indicação aproximada da área de estudo (Modificado de Zalán et al., 1987 e Milani e Thomaz Filho, 2000).

A coluna crono-litoestratigráfica, estabelecida para a Bacia do Paraná, observada na figura 2.2, destaca o intervalo estratigráfico de interesse para acumulação no Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito.

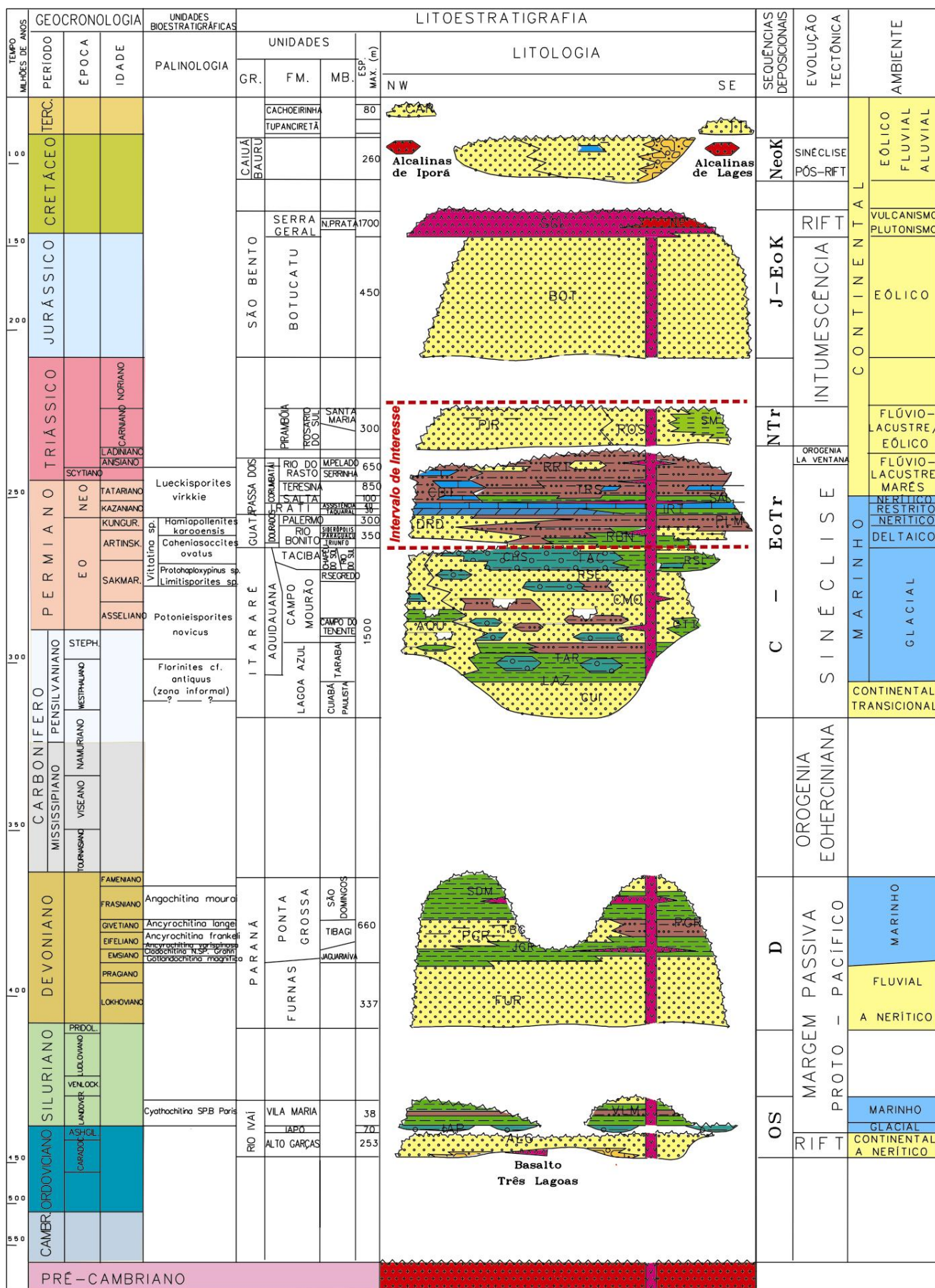


Figura 2.2 – Coluna crono-litoestratigráfica da Bacia do Paraná (modificada de Milani et al., 1994).
A seção referente ao Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Pirambóia encontra-se delimitada.

A prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná começou ainda no século XIX. Até meados do século passado, o principal método prospectivo consistia na perfuração de poços rasos, concentrados principalmente no Estado de São Paulo, próximos a arenitos betuminosos da Formação Pirambóia. Com a criação da Petrobras, em 1953, uma nova era na exploração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná teve início. Levantamentos sísmicos, de eletroresistividade e gravimétricos foram executados, bem como campanhas de mapeamento geológico em escala de 1:50.000 e perfurações de poços pioneiros. A partir de 1971 a Petrobrás começou uma nova etapa de perfuração de poços profundos em regiões com anomalias de drenagem e padrões de fratura com controle sísmico. As atividades da Petrobrás na bacia, em 1980, sofreram uma interrupção com a abertura para exploração de outras companhias sob contratos de risco. O Estado de São Paulo, em 1980, criou o consórcio CESP-IPT (Paulipetro). Como resultado da exploração, a companhia perfurou mais de 30 poços e foram registrados mais de 8.000 km de linhas sísmicas, além de cobrir vastas áreas com mapeamentos geológicos e aerogeofísicos. A British Petroleum (BP) também explorou a bacia, perfurando um poço e registrando cerca de 1500 km de linhas sísmicas. Estas duas empresas devolveram os blocos prospectados à Petrobras ainda na década de 80 (Zalán et al., 1990).

Recentemente a Petrobrás retomou a investigação de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná em diversas frentes de pesquisa. A UFPR, através de vários projetos de intercâmbio técnico-científico, auxilia a Petrobrás em pesquisas prospectivas na bacia, objetivando a modelagem de possíveis reservatórios usando trabalhos de campo e sísmica de alta resolução.

Diferentes métodos para interpretação de estruturas vêm sendo executados na Bacia do Paraná ao longo do tempo. Entre os mais consagrados pode-se citar o mapeamento de superfície, métodos geofísicos magnetométricos e gravimétricos, além de análises morfoestruturais em imagens de satélite e radar (Ferreira, 1982; Zalán et al., 1987; Soares, 1982, 1991 e Artur, 1998).

Apesar da grande quantidade de trabalhos no sentido de determinar lineamentos, poucos apresentam uma associação destas entidades com a acumulação de hidrocarbonetos. A maioria dos trabalhos concentra-se em aspectos puramente geométricos e tectônicos de estruturas, deixando de lado a relação existente entre estas feições e seus reflexos na integridade das rochas, por exemplo. Os primeiros trabalhos a tratarem da relação estruturas *versus* acumulações na bacia datam de 1960 (Sanford e Lange, 1960, apud Artur, 1998). O Consórcio Paulipetro, anteriormente citado, deu grande ênfase à relação entre estruturas tectônicas da bacia e acumulações de hidrocarbonetos, porém os aspectos de conduto para migração não tiveram um tratamento tão detalhado. Nos trabalhos de Zalán et al. (1987, 1990), através do uso de dados diversos, os autores definiram importantes zonas de estruturação subsuperficial para toda a bacia (Figura 2.3-A).

Uma comparação de aspectos estruturais reconhecidos em bacias produtoras e a Bacia do Paraná foi discutida por Soares et al. (1982). As estruturas de maior potencialidade para acumulação na bacia seriam domos assimétricos e flexuras sobre falhas verticais, envolvendo o embasamento. Estariam alinhadas paralelamente a estruturas de caráter regional, e apresentam características de trapas estruturais, estratigráficas ou mistas. Aqueles autores definiram, ainda, direções principais de lineamentos com imagens Landsat e de radar (ver figura 2.3-B).

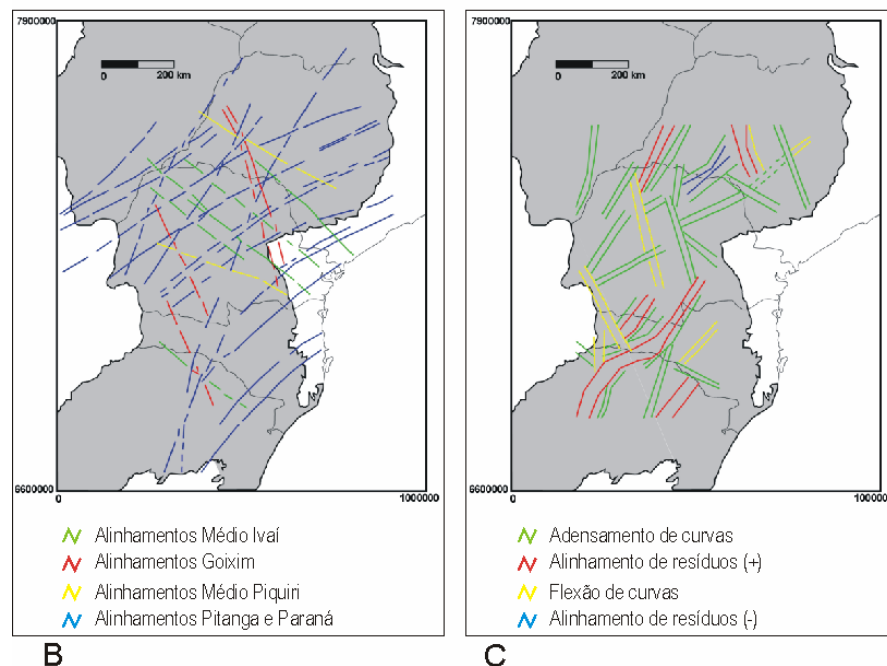
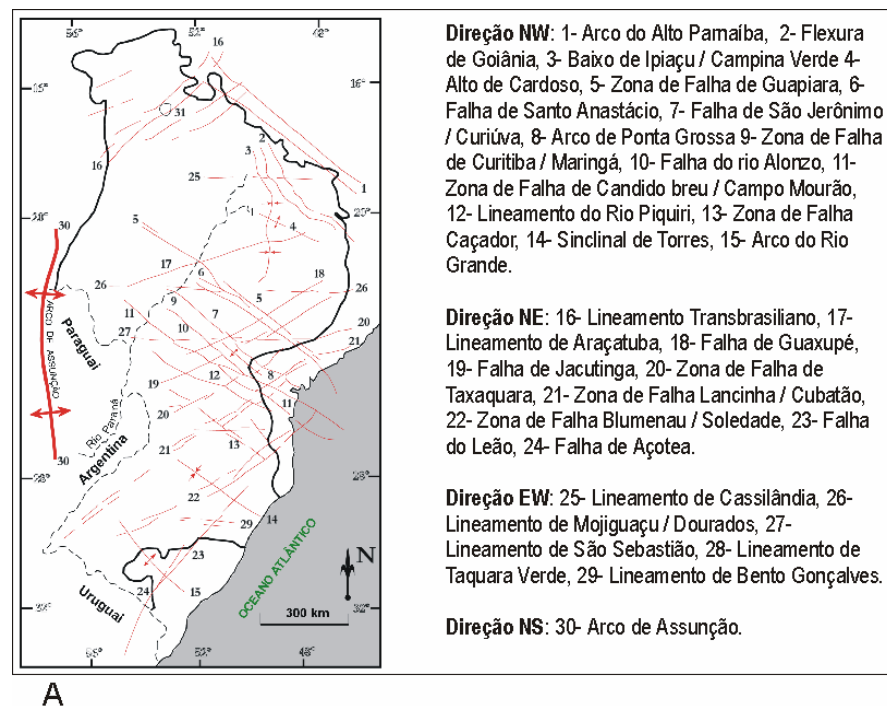


Figura 2.3 – Mapas regionais de lineamentos estruturais (adaptado de Zalán et al., 1987; Soares et al., 1982; e Artur, 1998). A – Lineamentos de Zalán et al. B – Lineamentos de Soares, et al., baseados em imagens de radar e Landsat; C – Lineamentos de Artur, baseados em levantamentos gravimétricos.

Uma análise geoestatística detalhada a partir de dados de isópacas e gravimétricos foi elaborada por Artur (1998). Este autor utilizou a modelagem por *krigagem* para definição de mapas de contorno, e a partir de mapas de isovalores inferiu paleolineamentos para determinada porção da bacia (ver Figura 2.3-C). Algumas direções inferidas por este autor apresentam respostas diferentes dos registros superficiais definidos por Soares et al. (1982), indicando assim estruturas importantes durante determinado intervalo temporal.

2.1 SISTEMA PETROLÍFERO IRATI-RIO BONITO (SP I-RB)

Demaison & Huizinga (1991) definem sistema petrolífero como uma entidade físico-química dinâmica, baseada em linhas gerais no binômio geração/concentração, relacionado a uma dada escala de tempo e espaço geológico. A delimitação de um sistema petrolífero depende de suas extensões geográfica e estratigráfica (Magoon & Dow, 1994). A extensão geográfica é relativa à área da bacia, incluindo a janela de geração até a trapa, e a extensão estratigráfica corresponde à seção sedimentar, com os respectivos elementos necessários à formação da acumulação (Figura 2.4). Para a companhia de serviços de exploração Schlumberger, sistema petrolífero refere-se, simultaneamente, a elementos e processos geológicos necessários para geração e acúmulo de hidrocarbonetos. Incluem-se como componentes a rocha geradora, rota ou rotas de migração, rocha reservatório, trapa (ou armadilha) e rocha selante (ou selo). Os processos envolvidos são a geração, migração, acumulação e preservação, devendo necessariamente apresentar uma relação temporal coerente (Schlumberger, 2004).

Na Bacia do Paraná são identificados dois sistemas petrolíferos, referentes às rochas geradoras das formações Irati e Ponta Grossa. Para estes sistemas são apontados cinco diferentes *plays*: Ponta Grossa-Itararé; Ponta Grossa-Rio Bonito; Irati-Rio Bonito; Irati-Pirambóia; e Ponta Grossa-Furnas. Os primeiros quatro *plays* apresentam ocorrências e, no quinto, apesar do potencial admitido, não foram detectadas ainda ocorrências. Os sistemas petrolíferos Ponta Grossa-Itararé e Irati-Rio Bonito são os de maior potencialidade, entretanto este último apresenta um nível de conhecimento muito menor que o primeiro.

O sistema petrolífero Irati-Rio Bonito/Pirambóia (SP I-RB/P), apresenta como rocha geradora folhelhos da Formação Irati, e como possíveis reservatórios arenitos das formações Rio Bonito e Pirambóia. As rochas do Membro Assistência da Formação Irati são, segundo dados geoquímicos, os melhores geradores de óleo da bacia (Zalán et al., 1990 e Araújo et al., 2000). Apesar de boas características de geradora, não apresenta espessura constante. Os arenitos deltáicos da Formação Rio Bonito têm excelentes características de permoporosidade e transmissibilidade

(Milani et al., 1990), enquanto aqueles da Formação Pirambóia apresentam características menos favoráveis, além de maior distância da geradora.

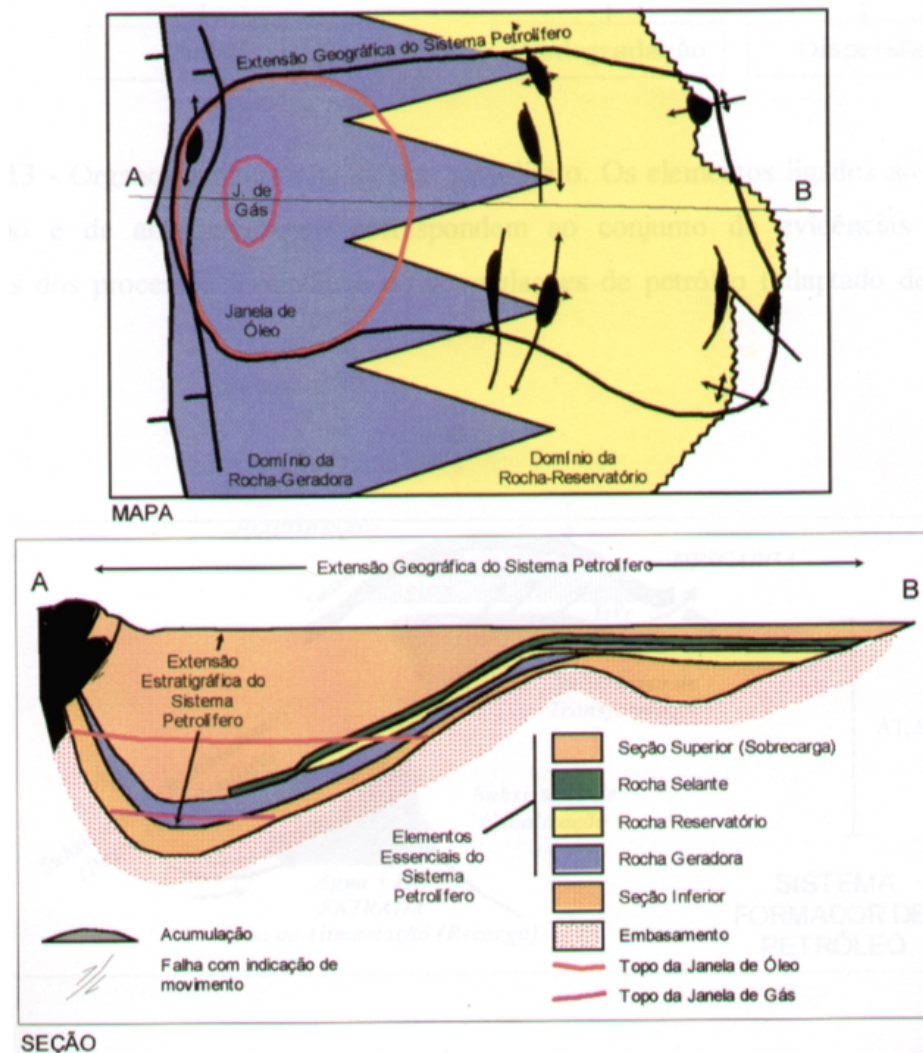


Figura 2.4 – Delimitação geográfica e estratigráfica de um sistema petrolífero. (Rostirolla, 1996, apud Artur, 1998).

Segue uma breve descrição litológica das formações inseridas no sistema petrolífero, bem como seus ambientes deposicionais associados (Milani et al., 1994):

Formação Rio Bonito (RBN na carta estratigráfica – figura 2.2): Arenitos, siltitos e folhelhos, contendo localmente camadas de carvão e calcário. Os arenitos variam de muito finos a grossos. Deposição em sistema flúvio-deltáico, costeiro a marinho raso.

Formação Palermo (PLM na carta estratigráfica – figura 2.2): Constituída principalmente por siltitos arenosos. Localmente ocorrem arenitos finos a médios no topo da unidade. Deposição em ambiente marinho regressivo.

Formação Irati (IRT na carta estratigráfica – figura 2.2): Folhelhos negros, por vezes betuminosos, fossilíferos, intercalados com dolomitos e calcários. O ambiente de deposição foi em mar raso restrito.

Formação Serra Alta (SAL na carta estratigráfica – figura 2.2): Argilitos, folhelhos e siltitos, fossilíferos e escuros, depositados em ambiente de mar raso.

Formação Teresina (TRS na carta estratigráfica – figura 2.2): Siltitos e arenitos muito finos intercalados, e calcários fossilíferos subordinados. O ambiente aqui já é continental flúvio-lacustre com influência de marés.

Formação Rio do Rasto (RRT na carta estratigráfica – figura 2.2): siltitos de cores variadas, com intercalações de argilitos, arenitos finos e níveis carbonáticos. Ambiente continental flúvio-lacustre com influência marinha restrita.

Formação Pirambóia (PIR na carta estratigráfica – figura 2.2): Arenitos médios a muito finos, bimodais. Na base ocorrem associados a argilas e no topo apresentam-se mais grossos e por vezes conglomeráticos. Ambiente transicional flúvio-lacustre/eólico.

Formação Botucatu (BOT na carta estratigráfica – figura 2.2): Arenitos finos a médios, bimodais, com níveis argilosos e conglomeráticos subordinados. Ambiente eólico.

Araújo et al. (2000) qualificam o SP I-RB/P como um sistema petrolífero atípico, conforme o conceito de Magoon e Dow (1994), devido à maturação anômala pela intrusão de *sills* de diabásio durante o vulcanismo juro-cretáceo da bacia. Uma tabela de eventos para os sistemas petrolíferos permianos da bacia é ilustrada na figura 2.5.

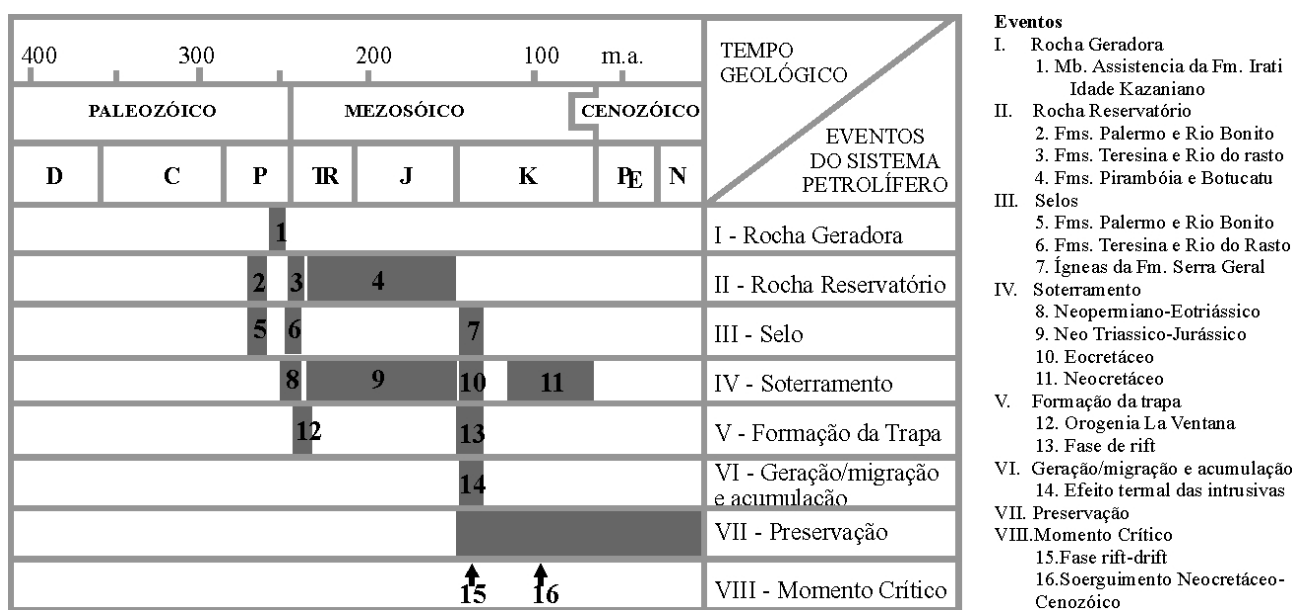


Figura 2.5 – Eventos mostrando os elementos e processos dos sistemas petrolíferos permianos na Bacia do Paraná (modificado de Araújo et al., 2000)

Através da análise estatística de dados de lineamentos regionais de várias origens e dados referentes a rochas intrusivas, Artur (1998) gerou também um mapa de favorabilidade para o Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Pirambóia (Figura 2.6b).

Com parametrização estatística de diversos dados, Bartoszeck (2000) gerou mapas de favorabilidade para o mesmo sistema petrolífero. O método consiste na utilização de ponderação de variáveis diagnósticas, através da quantificação de suficiência e necessidade, através de técnicas geomatemáticas e modelagem de depósitos (Rostirolla, 1998). A figura 2.6a mostra este mapa de favorabilidade.

A potencialidade para migração de hidrocarbonetos devido a efeito térmico pela intrusão de rochas básicas, e decorrente maturação, foi descrita por Araújo et al. (2000). Estes dados foram quantificados através de halo termal, carbono orgânico residual para as rochas da Formação Irati, carbono orgânico reconstituído, massa original de hidrocarbonetos livres, média da potencialidade original da rocha fonte, massa residual de hidrocarbonetos livres e distribuição da massa de hidrocarbonetos produzida por efeito térmico durante as intrusões. A figura 2.7a mostra o mapa de potencialidade para migração de hidrocarbonetos no sistema Irati-Rio Bonito/Pirambóia.

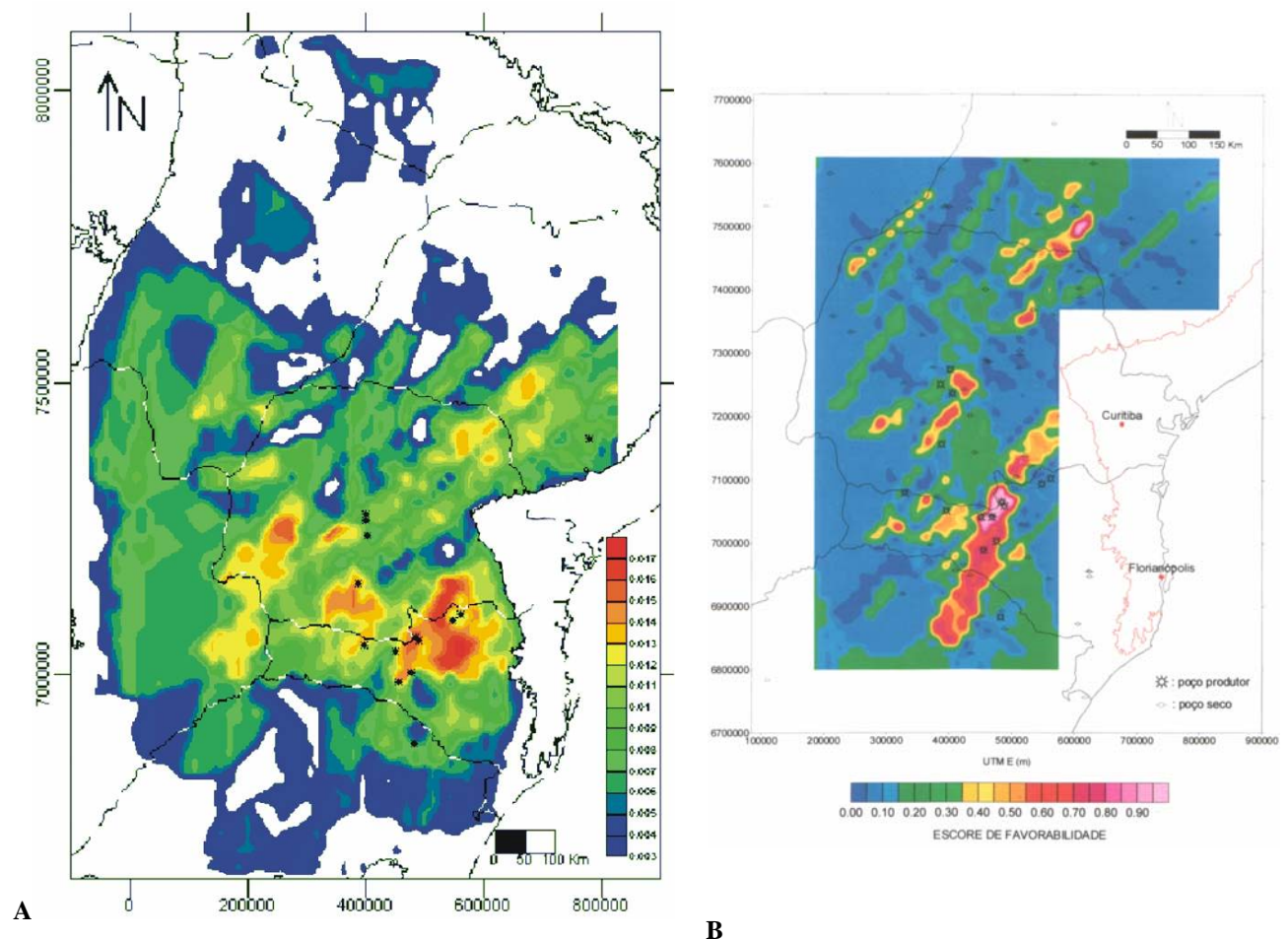


Figura 2.6 – Mapas de favorabilidade para prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná.

A- Bartoszeck (2000) e B- Artur (1998)

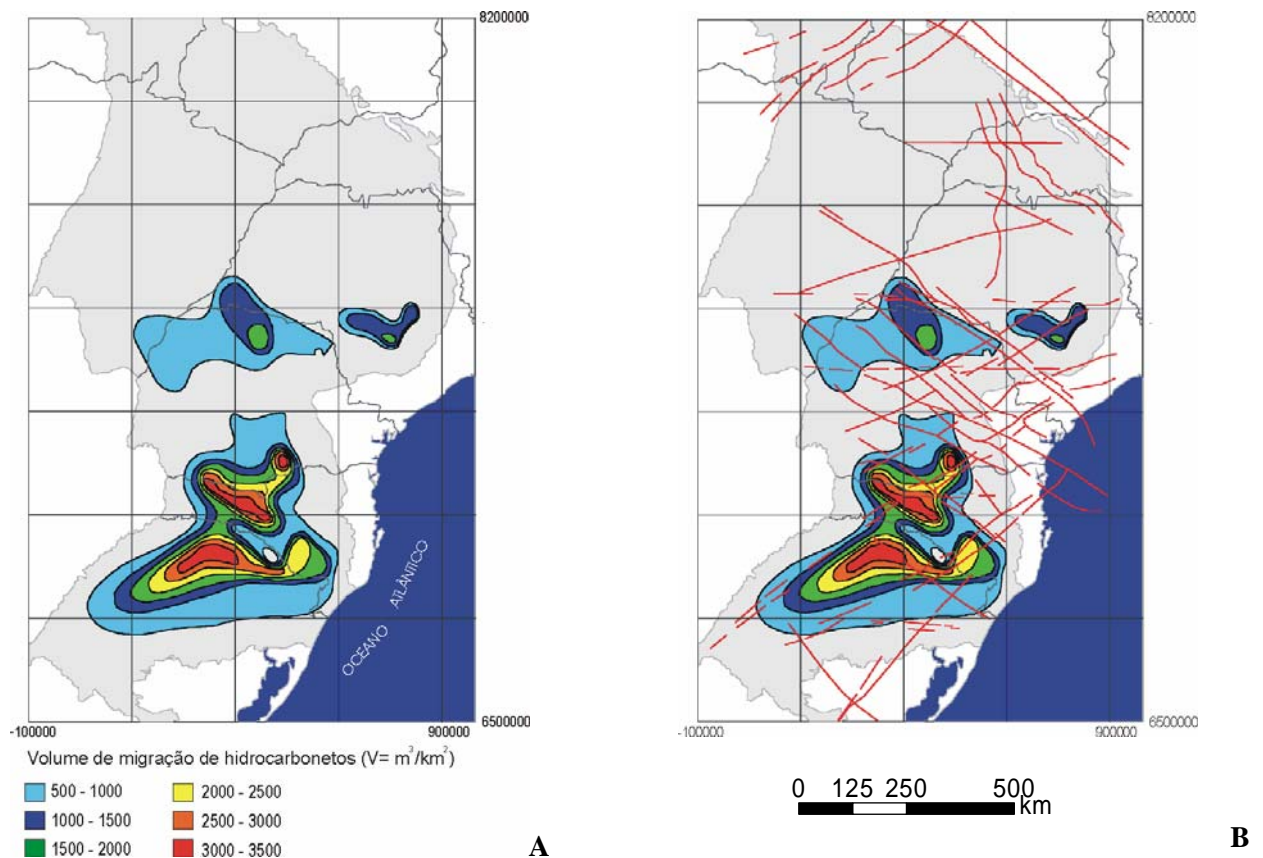


Figura 2.7 - A) Distribuição do volume da migração de hidrocarbonetos devido ao efeito térmico da intrusão de rochas ígneas na Formação Irati - Membro Assistência (Araújo et al., 2000); B) Correlação com as estruturas regionais de Zalán et al. (1987)

Como observado nas figuras anteriores, a área central que delimita os estados do Paraná e Santa Catarina apresenta grande favorabilidade para hidrocarbonetos, independentemente do método de avaliação. Com base nestes aspectos, então, foi delimitada a área de estudo. A relação das áreas de maior potencialidade com estruturas de cunho regional (Zalán et al., 1987) podem ser vistas na figura 2.7b. A compartimentação das zonas com maior potencial através de alguns lineamentos pode ser observada, e fica clara uma relação estreita entre os aspectos tectono-estruturais e a fisionomia das zonas onde há maior favorabilidade.

A reconstrução do embasamento da bacia, executada a partir de dados gravimétricos (Quintas, 1995) indica, para a área selecionada, dois diferentes blocos crustais em contato com direção principal NE-SW, o qual limita o Cinturão Ribeira a norte e o Cráton Rio de La Plata a sul (Figura 2.8a). Conforme Milani e Thomaz Filho (2000), na área selecionada, o embasamento da bacia também aparece segmentado. Para estes autores a Falha da Lancinha divide o embasamento entre a Faixa Móvel Apiaí e o Maciço de Joinville. Ainda outro maciço, segundo estes autores, é indicado ao noroeste da área de estudo (Figura 2.8b). Estas feições de cunho regional desempenharam papel fundamental durante a evolução da bacia, afetando de maneira direta aspectos relacionados ao condicionamento de diversas características do sistema petrolífero indicado. Além de promoverem significativas variações laterais nas espessuras dos diferentes

pacotes sedimentares, apresentam-se como condicionadoras de fluxo em células regionais. Localmente, associadas a estas estruturas de caráter regional, falhas de menores ordens de grandeza caracterizam-se como estruturas trapeadoras (Rostirolla et al, 2000). Torna-se, então, de fundamental importância a compreensão das geometrias e dinâmica de funcionamento destas grandes estruturas, bem como sua relação espacial com falhas e fraturas de menor escala relacionadas.

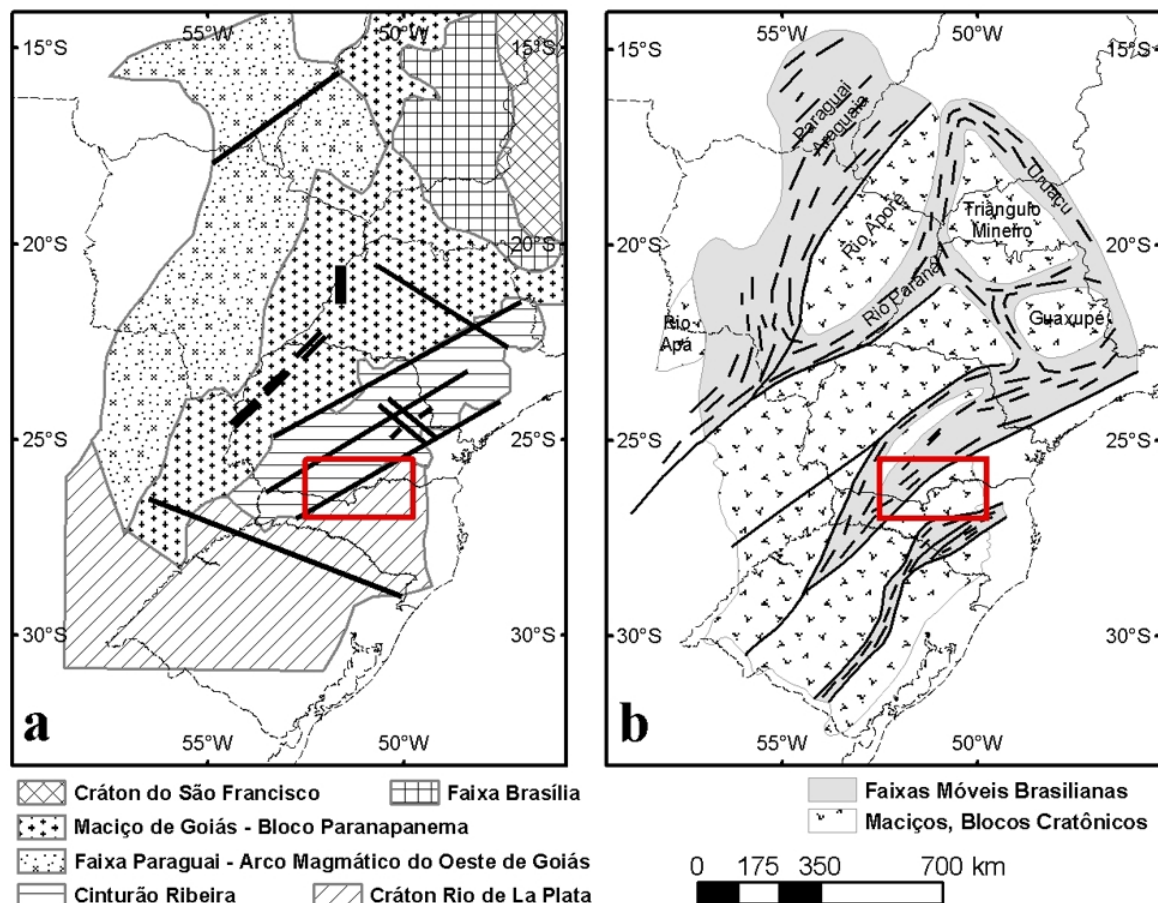


Figura 2.8 – Localização aproximada da área de estudo em duas reconstruções do embasamento da bacia.
a- Modificado de Quintas (1995) e b- Modificado de Milani e Thomaz Filho (2000).

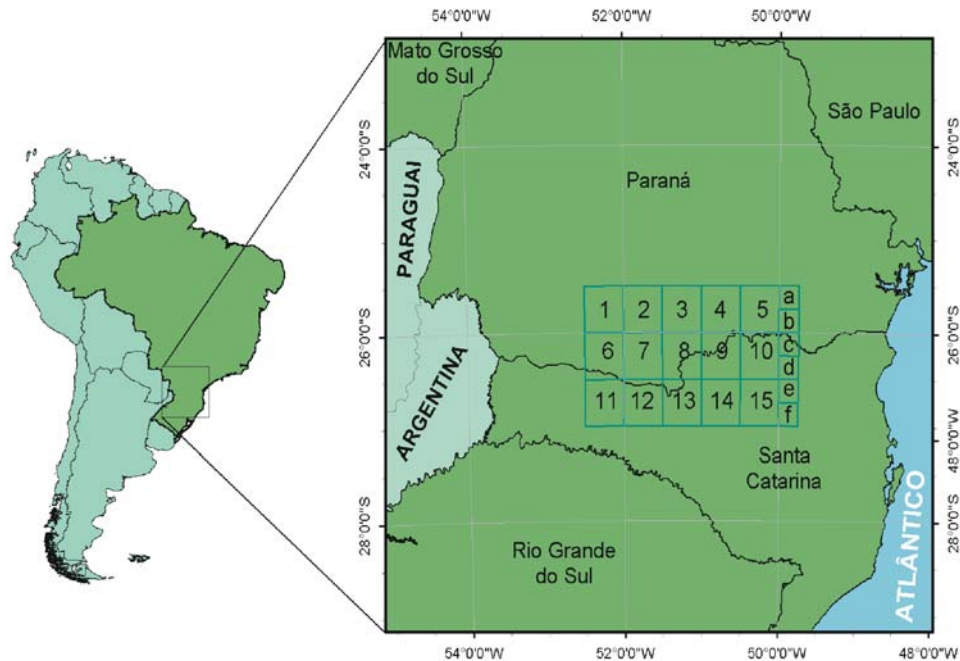
2.2 LOCALIZAÇÃO, GEOLOGIA E ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

A área de estudo encontra-se inserida na entidade geotectônica Bacia do Paraná, abrangendo partes dos estados do Paraná e Santa Catarina. É limitada pelas coordenadas 25°30'00" a 27°00'00" Sul e 49°45'00" a 52°30'00" Oeste, perfazendo 45629 km² (Figura 2.9).

As rochas apresentam idades desde o Eodevoniano (Formação Furnas, presentes no extremo nordeste da área) até depósitos recentes, associados a sedimentos fluviais (Figura 2.10).

As altitudes variam aproximadamente de 270 a 1450 metros, com padrões de declividade extremamente variados (Figuras 2.11 e 2.14). A região estudada compreende os segundo e terceiro

planaltos (definições para o Estado do Paraná), estendendo-se da escarpa “Devoniana” a leste até os basaltos da Formação Serra Geral a oeste.



Cartas 1:100.000: 1- Mangueirinha; 2- Pinhão; 3- Inácio Martins; 4- Rebouças; 5- São Mateus do Sul; 6- Clevelândia; 7- Palmas; 8- União da Vitória; 9- Irineópolis; 10- Canoinhas; 11- Xanxerê; 12- Hercílioópolis; 13- Caçador; 14- Lebon Régis; 15- Santa Cecília.

Cartas 1:50.000 : a- Porto Amazonas; b- Primeiro Faxinal dos Castilhos; c- Mafra; d- Itaipópolis; e- Rio Itajaí do Norte; f- Witmarsum.

Figura 2.9 – Localização da área de estudo e mosaico das cartas topográficas relacionadas.

Na área estudada, a porção inserida no segundo planalto é limitada à leste, como já citado, pela escarpa “Devoniana” e a oeste pela escarpa “Triássica”. A paisagem tem um aspecto senil, e as características de alternância entre arenitos compactos, conglomerados e pelitos nas rochas da região, tem suma importância para a caracterização das formas de relevo deste planalto (Bigarella et al., 1994). Geralmente é possível estabelecer uma relação entre os argilitos com vales largos de encostas suaves, enquanto as rochas areníticas compõem uma paisagem mais acidentada, com presença de outeiros e, por vezes, degraus bem marcados e íngremes (Figura 2.12). Seguindo da região leste para a oeste, as formas de terreno tornam-se mais acidentadas.

O terceiro planalto é considerado uma região fisiográfica mais simples. Na área estudada é formado exclusivamente por rochas efusivas da Formação Serra Geral, levemente inclinadas em direção ao vale do Rio Paraná. É uma região suavemente ondulada, com chapadas de encostas e, por vezes, com presença de mesas (Figura 2.13). As estruturas geológicas assumem papel fundamental na evolução da paisagem nesta região. Os canais fluviais encontram-se, mormente, esculpidos em regiões relacionadas à falhas e juntas (Bigarella et al., op. cit).

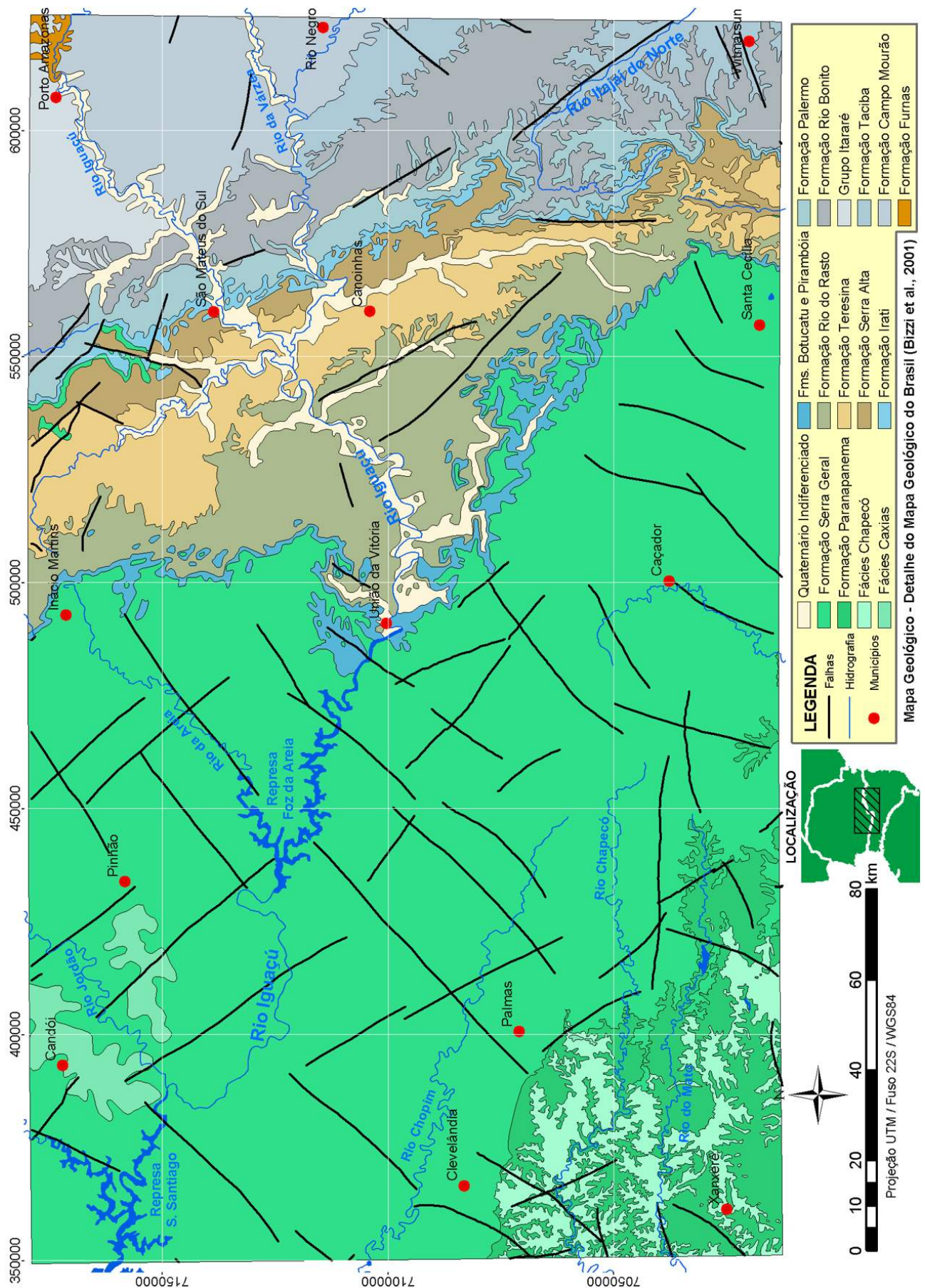


Figura 2.10 – Mapa geológico simplificado da área estudada (Bizzi et al., 2001)

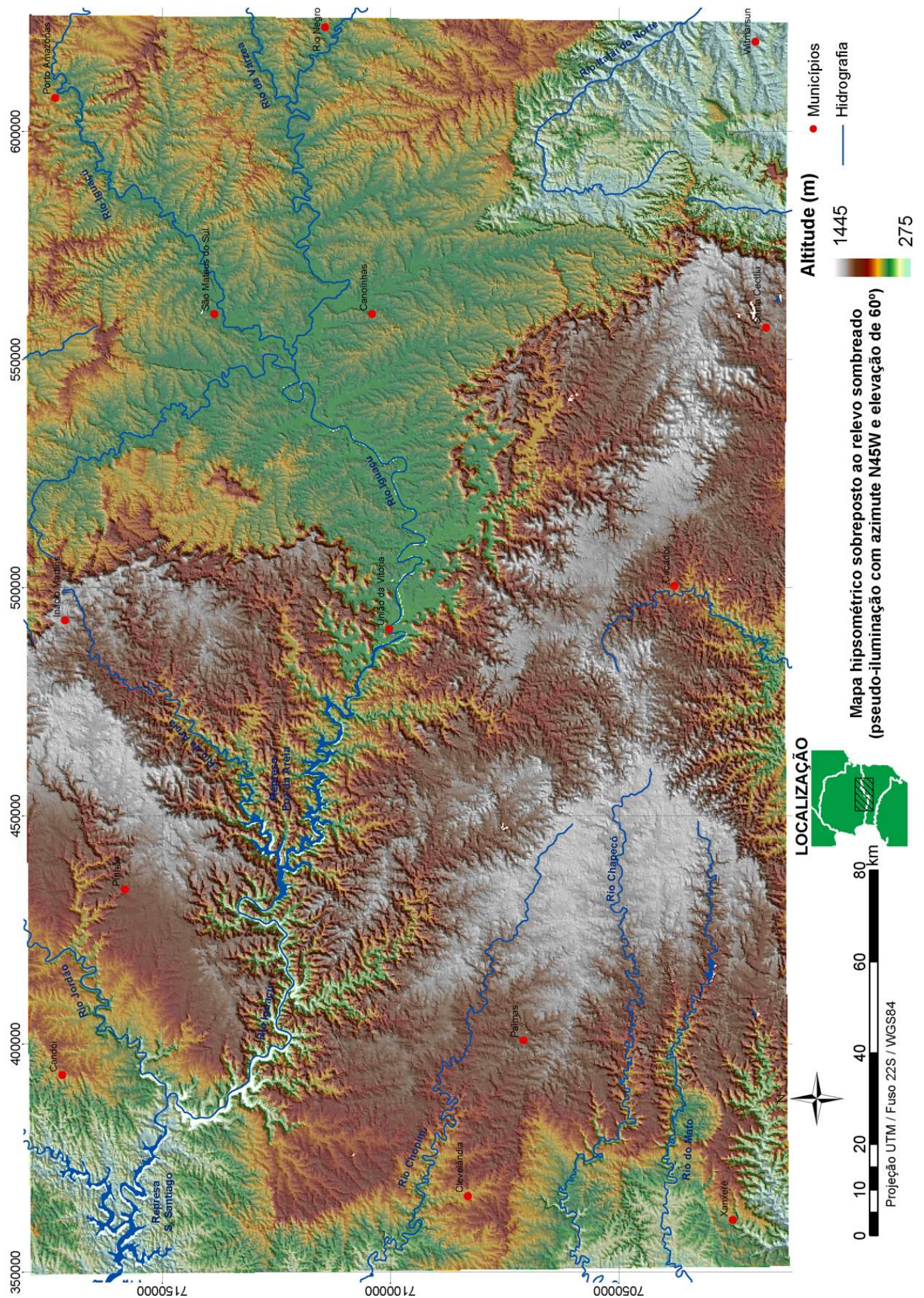


Figura 2.11 – Mapa hipsométrico e relevo sombreado (usando SRTM - reamostrado para resolução de 150 metros)

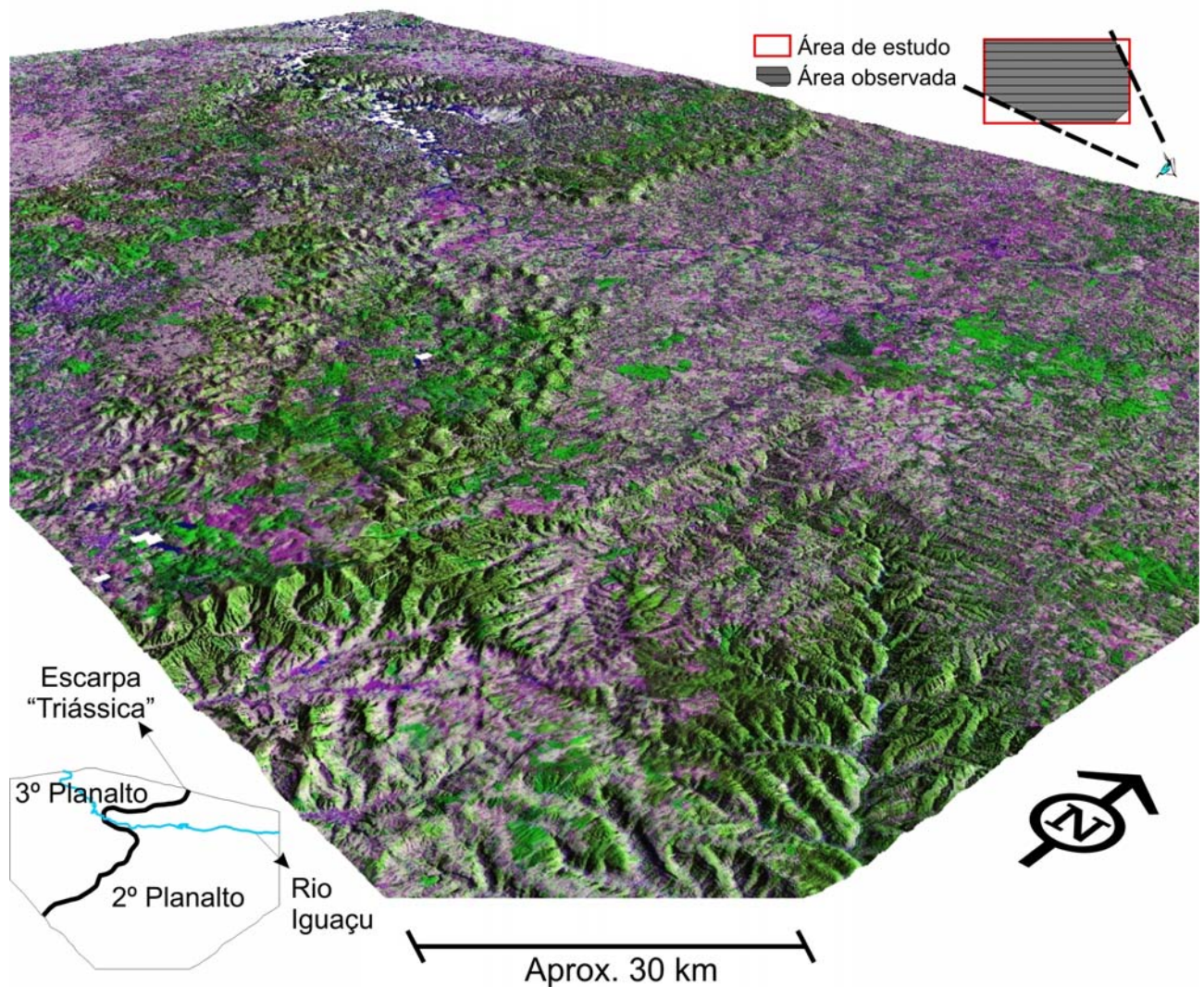


Figura 2.12 – Aspecto do segundo planalto na área estudada. Visada NW do extremo sudeste da área estudada. Imagem Landsat7 (5,4,3) ajustada ao MDE SRTM90 (grade reamostrada para 400m).
Em primeiro plano, à direita, o Vale do Rio Itajaí do Norte no Estado de Santa Catarina.

A declividade está relativamente controlada pelas drenagens. A escarpa “Triássica” constitui a região de maior continuidade para elementos com alta declividade, perfazendo um trajeto sinuoso que corta a área de seu extremo sul ao extremo norte. A porção centro-noroeste, na região onde os rios Iratim, Areia e Butiá encontram o Rio Iguaçu, também representa uma região de maior declividade. No extremo sudoeste da área, associados aos vales dos rios Chapecó, Chapecozinho e, principalmente, no Vale do Rio Irani, há regiões de alta declividade. Ainda são encontradas regiões de declividades acentuadas ao sul, associadas ao Rio Santo Antônio, e na porção sudeste, no vale do Rio Itajaí do Norte (Figura 2.14). Outro aspecto notável é a característica bastante plana da região noroeste do vale do Rio Itajaí do Norte, associada ao Rio Iguaçu.

Os aspectos referentes à rede de drenagem também são bastante variados, com alguma predominância para os padrões dendríticos a retangulares e, em menor proporção, o padrão paralelo

(Figura 2.15). Na porção leste da área, local de exposição da seção paleozóica, o alongamento médio das bacias de 3º e 4º ordens ocorre preferencialmente na direção N-S. Já para a porção de ocorrência dos derrames mesozóicos, os eixos principais das bacias não apresentam um direcionamento tão claro. Ocorre, nesta porção, entretanto, uma maior quantidade de bacias alongadas na direção E-W.

No do mapa de direção de fluxo (mapa de aspecto, que expressa o azimute do mergulho da encosta) nota-se maior quantidade de declives voltados para o setor WNW (Figuras 2.16 e 2.17). Mais adiante, neste trabalho, são indicadas correlações entre aspecto, declividade e regiões fraturadas (USGS, 1987).

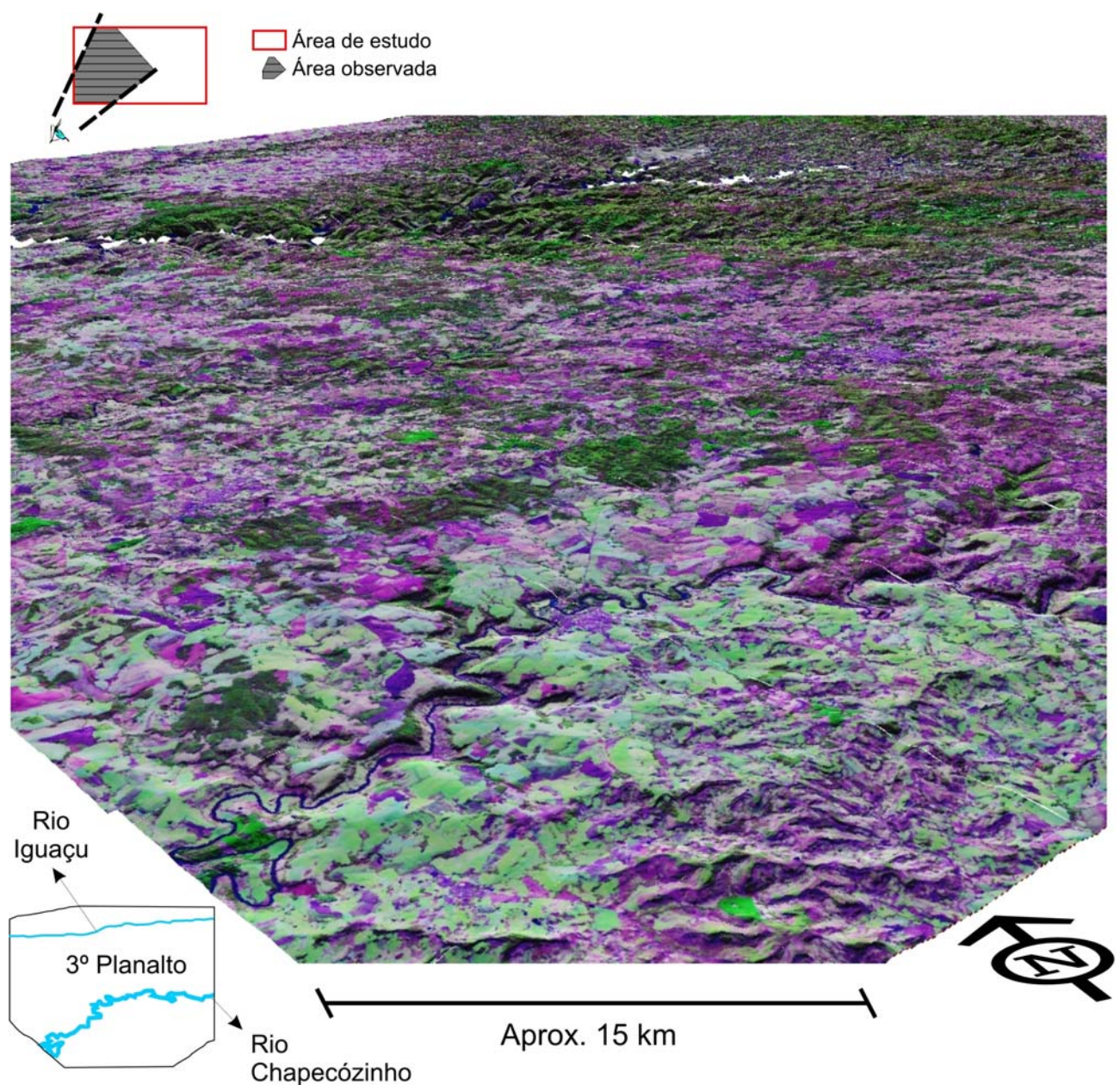


Figura 2.13 – Aspecto do Terceiro Planalto na área estudada. Visada em direção NE do sudoeste da área. Imagem Landsat7 (5,4,3) ajustada ao MDE SRTM90 (grade reamostrada para 400m). Nota-se, em primeiro plano, o aspecto meandrante do Rio Chapecózinho.

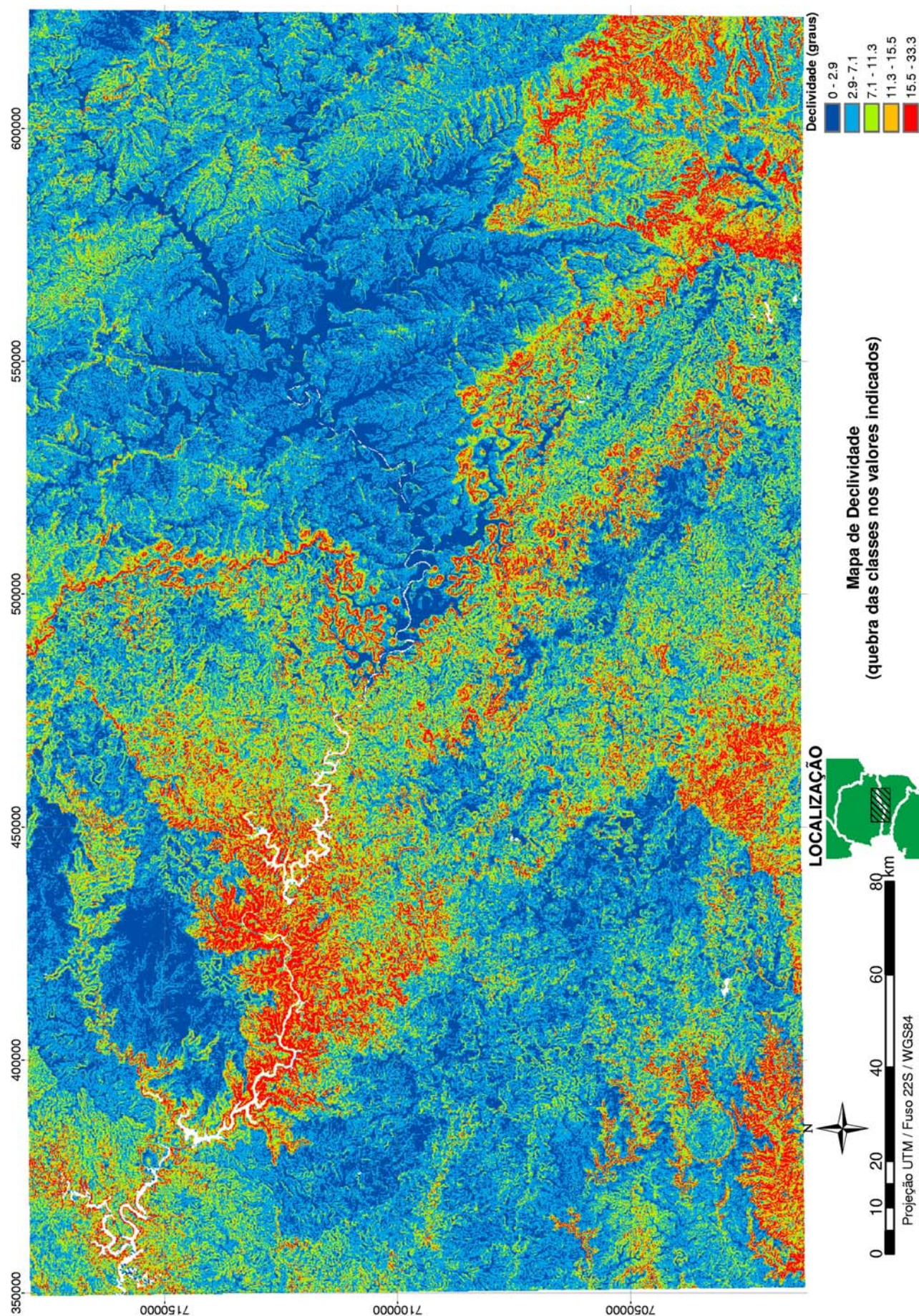


Figura 2.14 – Mapa de declividade (extraído do MDE SRTM, reamostrado para 150 metros).

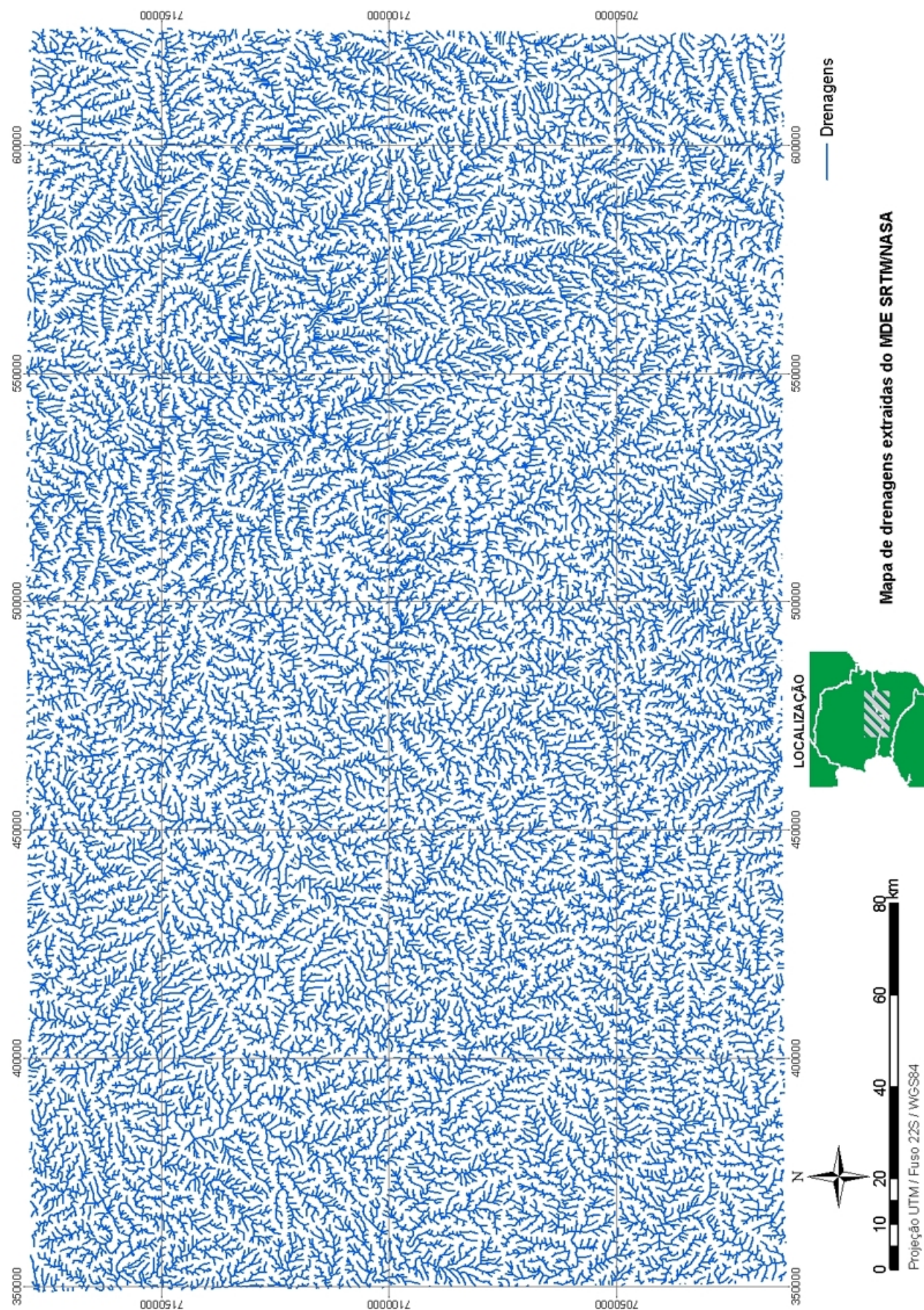


Figura 2.15 – Mapa de drenagens da área estudada (extraído do modelo SRTM90).

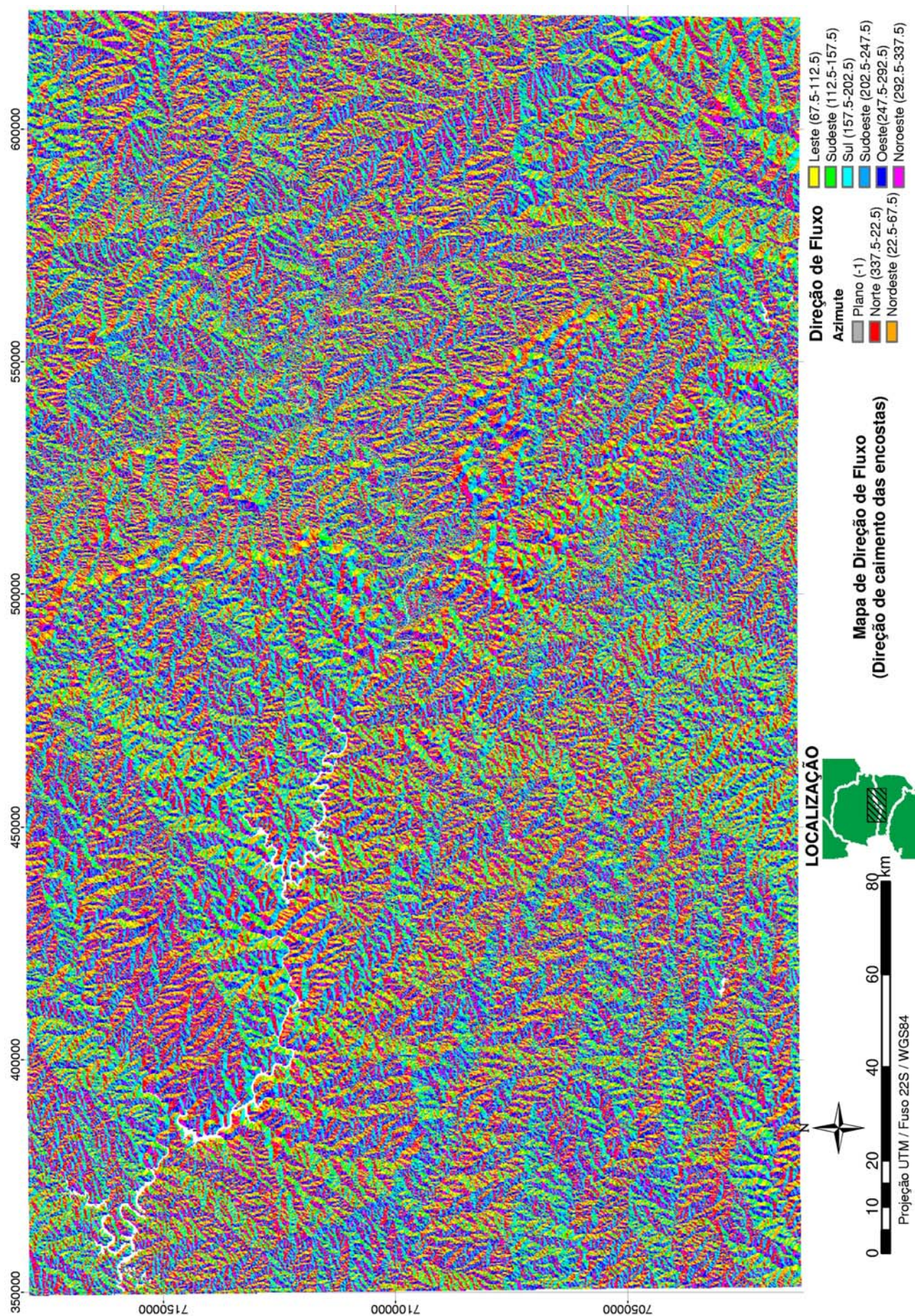


Figura 2.16 – Mapa de aspecto ou direção de fluxo (extraído do MDE SRTM, reamostrado para 150 metros).

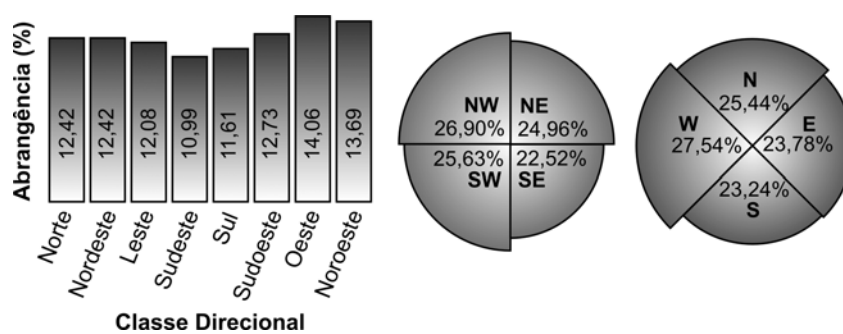


Figura 2.17 – Diagramas indicando proporção entre as classes de direção de fluxo.
(dados extraídos do mapa de aspecto – ver figura 2.16).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho são apresentados neste capítulo, por etapas executadas. Em cada um dos itens são indicados os dados, os métodos de processamento e as ferramentas utilizadas. A revisão bibliográfica referente aos métodos é também discutida, quando necessária. Os métodos empregados na implementação dos programas computacionais encontram-se em um capítulo separado (Capítulo 4).

3.1 DADOS CARTOGRAFADOS

Visando agilizar a forma de trabalho, os dados cartografados, utilizados para as diversas análises, foram inseridos em um banco de dados georreferenciados. Desta forma, informações de diversos níveis e hierarquias, puderam ser confrontadas empregando-se técnicas específicas de geoprocessamento. Todos os itens inseridos no mencionado banco de dados estão projetados em UTM - Fuso 22 Sul, datum WGS-1984.

Para critério de posicionamento geográfico foram compiladas 21 cartas topográficas entre os estados do Paraná e Santa Catarina. As cartas foram obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e também com a Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), do Exército do Brasil. A área de estudo foi recoberta por 15 cartas em escala 1:100.000 e 6 cartas em escala 1:50.000 (ver figura 2.9). As cartas foram convertidas para formato digital com uso de *scanner*, montadas com o uso do *software* PanaVueTM v. 2.05 e posteriormente georreferenciadas e inseridas no banco de dados através do programa ArcMapTM v. 8.3.

As cartas geológicas dos estados do Paraná (DNPM e MINEROPAR, 1989) e Santa Catarina (DNPM/SC, 1986) também foram convertidas para formato digital utilizando-se as mesmas técnicas descritas acima. Posteriormente, os contornos das unidades geológicas das duas cartas, bem como feições estruturais (falhas e diques), foram vetorizados em formato *shapefile* (ESRI) também com o uso do programa ArcMapTM. Com os mapas em formato vetorial, foi então executada uma integração das unidades geológicas dos dois estados. As unidades geológicas foram usadas como base litológica para elaboração do mapa lito-estrutural apresentado no trabalho. Seu aspecto pode ser observado na figura 3.1.

Além dos dados acima indicados, uma série de mapas temáticos foi também convertida a formato digital e inserida no banco de dados visando auxiliar as análises e interpretações. Entre estes podem-se citar os grandes lineamentos de Soares et al. (1982), Zalán et al. (1987) e Artur (1998), mapas de reconstruções do embasamento (Quintas, 1995; Milani e Thomaz Filho, 2000) e mapas referentes a condicionamentos de diversos tipos do SP I-RB (Araújo et al., 2000).

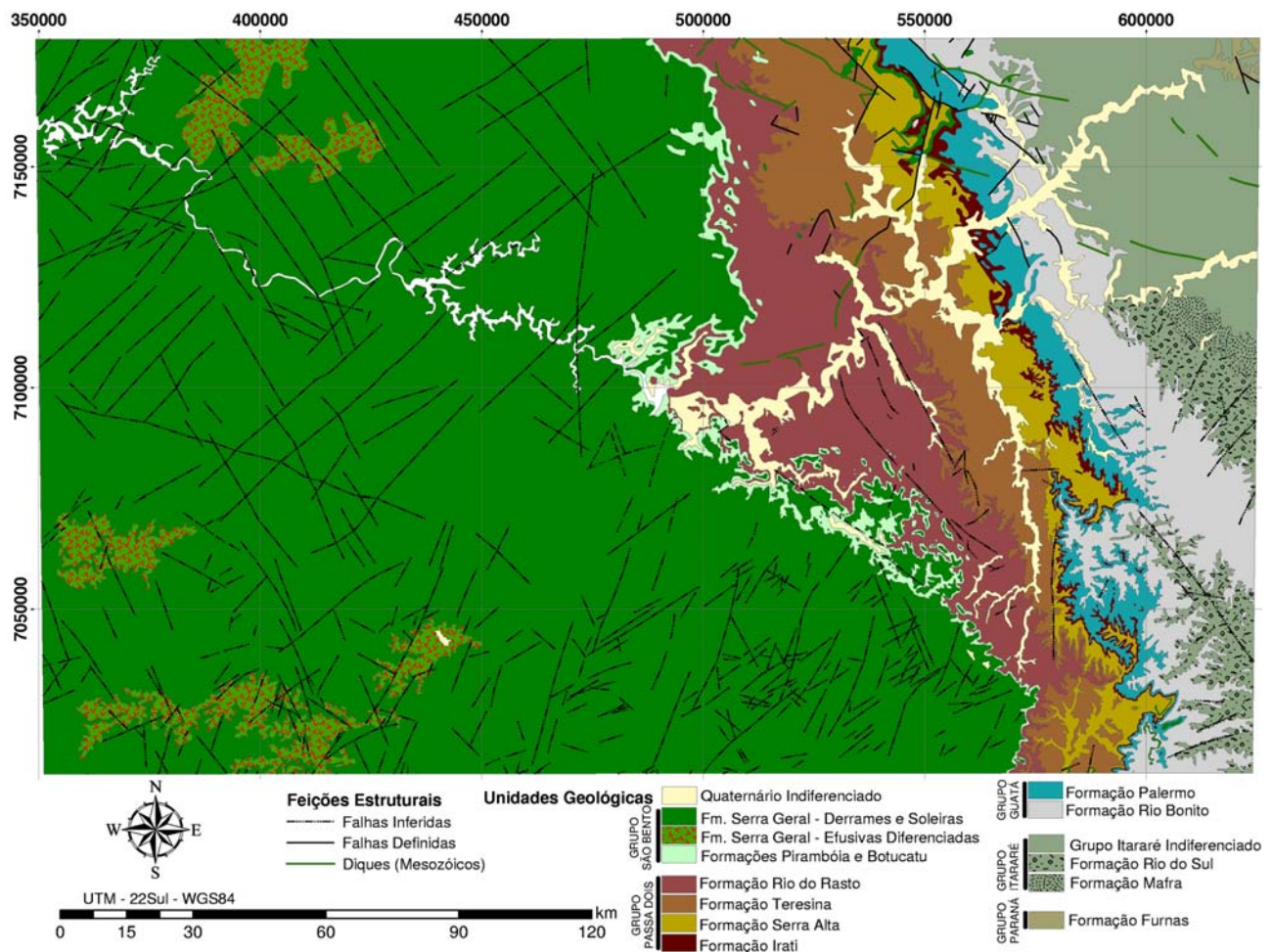


Figura 3.1 – Aspecto do mapa geológico integrado. Compilado dos mapas geológicos dos estados do Paraná (MINEROPAR e DNPM, 1989) e Santa Catarina (DNPM/SC, 1986).

3.2 TRAÇADO DE LINEAMENTOS A PARTIR DE SENSORES DE SUPERFÍCIE

Para a área estudada foram interpretados lineamentos a partir de imagens LANDSAT7 ETM+ e do modelo digital de elevação (MDE) SRTM90, ambos fornecidos e pré-processados pela agência aeroespacial norte-americana - NASA. A definição de lineamentos utilizada neste trabalho é aquela indicada por O'Leary et al. (1976) baseada na definição original de Hobbs (1904, apud O'Leary 1976). Estes autores os definem como “feições mapeáveis, simples ou compostas, onde as partes estão alinhadas em uma relação retilínea ou levemente curva, e que diferem das estruturas adjacentes, provavelmente refletindo um fenômeno de subsuperfície”.

Desta forma foram obtidos cerca de 33000 lineamentos a partir das imagens LANDSAT7 e 12500 lineamentos a partir do modelo SRTM90 (Figura 3.2 e Anexo 1). Estes lineamentos foram então integrados ao banco de dados georreferenciado para posteriores análise.

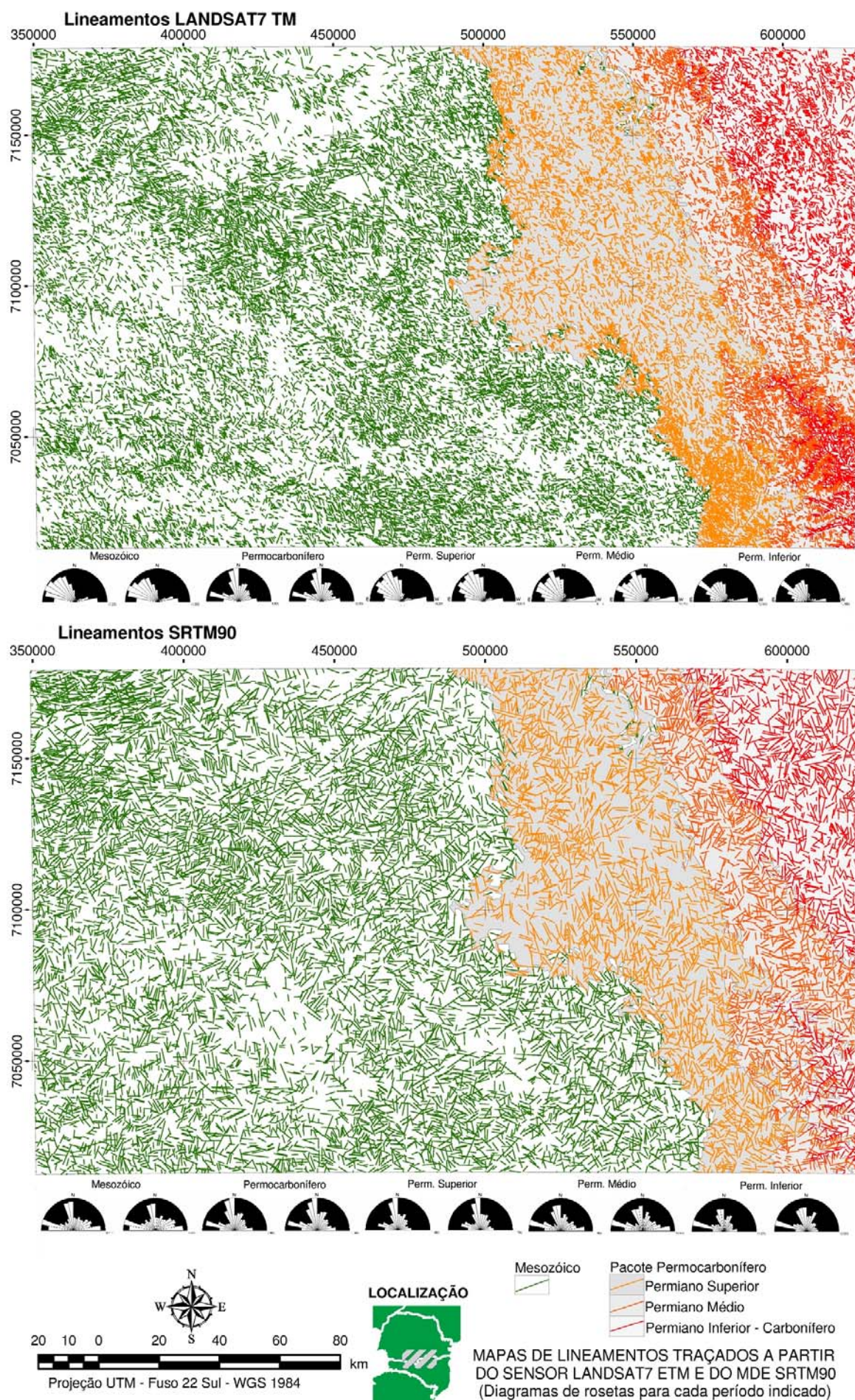


Figura 3.2 – Aspecto dos lineamentos obtidos com os sensores indicados e comportamento direcional.

3.2.1 Obtenção dos lineamentos a partir do sensor LANDSAT7 ETM+

O sensor orbital LANDSAT7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) obtém cenas com cerca de 185 km por 185km de imagens multi-espectrais, divididas em um total de 9 bandas, sendo duas destas termiais. As bandas do espectro visível e do infravermelho (bandas 1 a 5 e banda 7), apresentam resolução espacial de 30 metros. As bandas do infravermelho termal (6h e 6l – alto e baixo ganho) têm resolução de 60 metros, enquanto a banda pancromática (banda 8) apresenta 15 metros de resolução espacial. Imagens LANDSAT7 possuem uma variada gama de utilizações e escalas de uso, sendo comumente empregadas em trabalhos com escalas de 1:25.000. Na tabela 3.1 podem ser observados os valores dos comprimentos de ondas para cada banda do sensor (Williams, 2004).

Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
0.45 - 0.52	0.53 - 0.61	0.63 - 0.69	0.78 - 0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.09 - 2.35	0.52 - 0.90

Tabela 3.1 – Valores dos comprimentos de ondas para cada banda do sensor LANDSAT7 ETM+ (valores em micrômetros).

Para a área estudada foram utilizadas, parcialmente, 4 cenas distintas deste sensor, a saber 221/078, 222/078, 221/079 e 222/079. O mosaico destas cenas pode ser observado na figura abaixo.

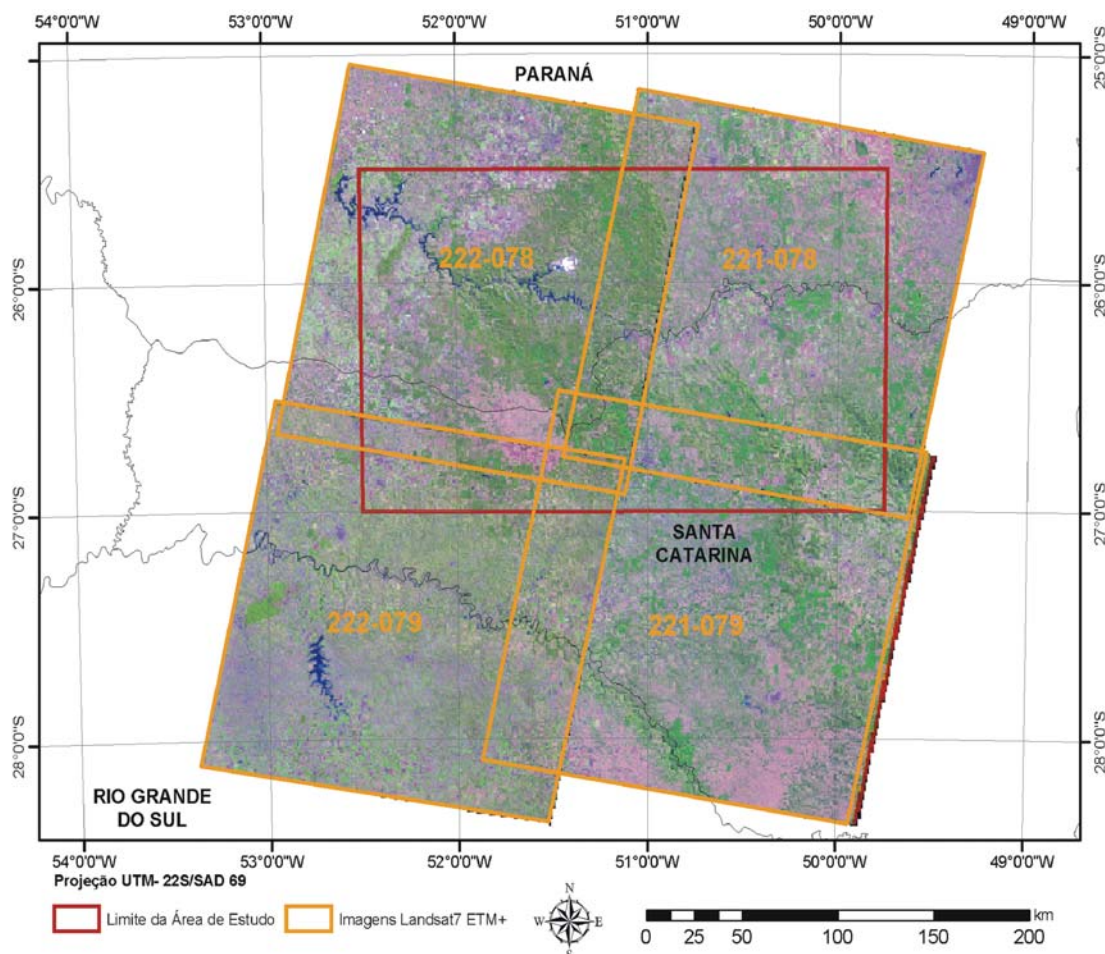


Figura 3.3 – Mosaico das imagens LANDSAT7 ETM+ utilizadas (composição R5G4B3).

Devido à característica de ser um sensor passivo, ou seja, depender de fonte externa de emissão de luz, neste caso o sol (Queiroz et al., 2000; Williams, 2004), as imagens LANDSAT7 utilizadas apresentam característica de iluminação a partir da direção NE-SW, desta forma destacando estruturas NW-SE. Para minimizar esta tendência foram utilizadas técnicas de filtragem direcional nas imagens analisadas (PCI, 2003). Foram testados dois tipos distintos de filtragens. Inicialmente foi utilizado o filtro PREWITT, que utiliza um algoritmo para realce de contrastes ou bordas. A filtragem que apresentou os melhores resultados foi através do uso do filtro de SOBEL (Akhir e Abdullah, 1997; Novak et al., 2000; Kocala et al., 2004; Bolton, 2004) com máscaras matriciais 3x3. Este filtro funciona a partir do conceito de gradiente, utilizando uma ponderação entre os valores adjacentes para detectar as feições. Antes da aplicação deste filtro a imagem foi processada com um filtro passa-baixa intermediário. As imagens foram então filtradas nos sentidos N-S, E-W, NW-SE e NE-SW. As matrizes de SOBEL utilizadas para cada direção de filtragem indicada encontram-se na tabela 3.2. Ambas as filtragens direcionais foram executadas no programa PCI Geomática v. 8.2.

N-S			E-W			NW-SE			NE-SW		
-1	0	1	-1	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0
-2	0	2	0	0	0	-1	0	1	-1	0	1
-1	0	1	1	2	1	-2	-1	0	0	1	2

Tabela 3.2 – Matrizes de SOBEL para as filtragens direcionais aplicadas.

Além das técnicas para filtragens direcionais, durante a interpretação dos lineamentos foram utilizadas variações com diferentes composições de imagens RGB, diferentes algoritmos de realce (e.g. desvios padrão e equalização de histogramas), além de variações em contraste e intensidade de cores exemplificadas na figura 3.4. Foram utilizadas no traçado dos lineamentos, principalmente, as bandas 4 e 5 em tons de cinza, além de composições RGB 5, 4, 3 e 8, 5, 4. O critério para seleção das bandas foi tanto visual como baseado em bibliografia referente (Akhir e Abdullah, 1997; Madani, 2001; Florenzano et al., 2001).

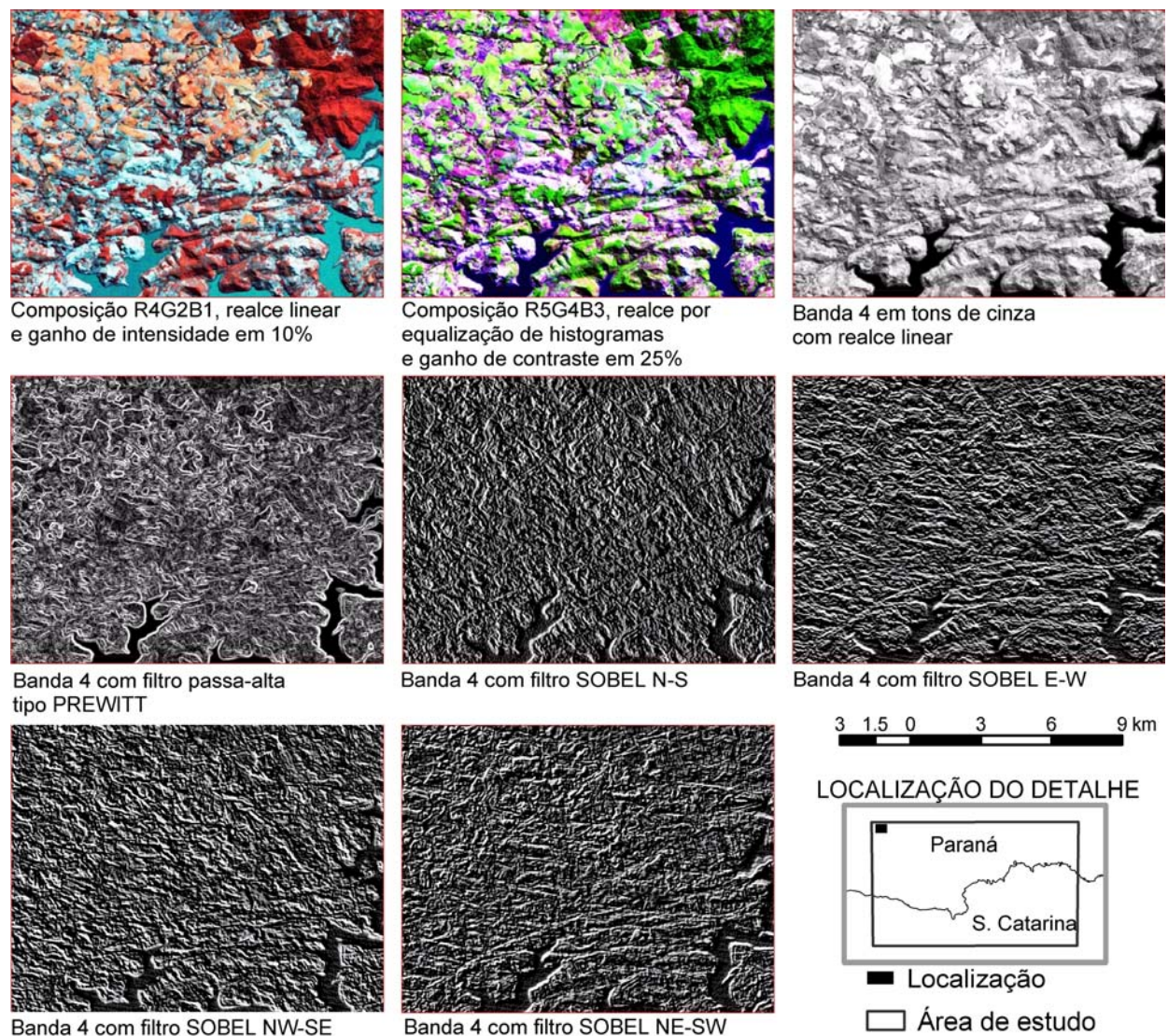


Figura 3.4 – Aspectos da imagem LANSAT7 com diferentes técnicas de visualização.

3.2.2 Obtenção de lineamentos a partir do MDE SRTM90

O projeto SRTM, sigla para *Shuttle Radar Topography Mission*, é uma missão conjunta entre NASA, NIMA (agência de mapas e imagens norte-americana), DLR (agência espacial alemã) e ASI (agência espacial italiana), que tem por objetivo gerar um modelo digital de elevação para cerca de 80% das áreas continentais do planeta. A obtenção dos dados foi executada entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000, com aquisição de aproximadamente 12 *terabytes* de dados brutos. O método utilizado para obtenção destes dados foi a interferometria de dados de radares, utilizando como plataforma o veículo espacial Endeavour. Foram usados dois radares (tipo SAR – *Synthetic Aperture Radar*, bandas C e X), um deles no compartimento de carga do veículo e outro distanciado de 60 metros, instalado na ponta de um braço mecânico acoplado ao veículo. Após a coleta dos dados segue a fase de processamento e disponibilização, com previsão de entrega de todo o modelo com resolução de 90 metros para o ano de 2005 (Ramirez, 2004).

Os dados numéricos utilizados neste trabalho foram obtidos via *internet*, a partir do sítio da USGS (USGS et al., 2004), em grade formato nativo ARC-Info (binário, com extensão *adf*), para toda a exposição da Bacia do Paraná. Devido à impossibilidade de obtenção de arquivos maiores a 100 *megabytes*, a área foi segmentada em porções de aproximadamente 3° por 3°, e posteriormente unida através de processo de mosaico, utilizando-se o pacote *raster calculator* dentro da extensão Spatial Analyst, ArcMapTM. Foi então gerado um mosaico para toda a bacia, bem como outro para a área estudada, por questões de diminuição nos tempos de processamento de imagens.

As grades originais são fornecidas em graus decimais no Datum WGS84, com resolução horizontal reduzida para aproximadamente 90 metros (daí SRTM90). As demais resoluções e acurácias são as mesmas indicadas na tabela 3.3. Para maior comodidade nos processamentos, visto que o atributo altitude encontra-se em metros, as coordenadas planas foram convertidas para UTM (Fuso 22 Sul), desta forma tendo a mesma unidade nos referenciais X,Y e Z. Utilizando-se estes dados em sua maior resolução, foi possível trabalhar em uma escala de aproximadamente 1:100.000.

Para o traçado dos lineamentos, os dados foram processados basicamente com técnicas de pseudo-sombreamento e hipsometria (ESRI, 2002). Além destas duas técnicas foram utilizadas sobreposições através do emprego de transparência. Ainda através da utilização de pseudo-sombreamento, foram gerados modelos estereoscópicos de dois tipos diferentes para análise destas imagens - anaglifo e ChromaDepth - para a área em estudo, bem como para toda a Bacia do Paraná.

Resolução Horizontal	1 arco segundo (aprox. 25 metros)
Variação Mínima Vertical	1 metro
Datum (horizontal e vertical)	WGS 84
Formato dos Dados	inteiro de 16 <i>bits</i>
Acurácia Horizontal (absoluta)	± 20m
Acurácia Horizontal (relativa)	±15m
Acurácia Vertical (absoluta)	±16m
Acurácia Vertical (relativa)	±6m

Tabela 3.3 – Algumas especificações dos dados SRTM.

A técnica de estereoscopia por anaglifos consiste na sobreposição de duas imagens de um mesmo local tomadas de dois diferentes referenciais (Figura 3.5). A sensação de profundidade é

dada pela paralaxe entre as duas imagens. Cada uma delas é então filtrada para as cores complementares vermelho e ciano e então são sobrepostas. A percepção tridimensional é dada através do uso de óculos específicos com lentes nas cores indicadas. Neste trabalho foram executados para a área de estudo anaglifos também com pseudo-iluminação NE e NW. Para suas gerações foram simuladas visadas de pontos diferentes através do uso do programa ArcSceneTM (pacote vinculado ao ArcMapTM) e depois sobrepostas e filtradas em ciano e vermelho com o programa de domínio público Anaglyph Maker 1.06.

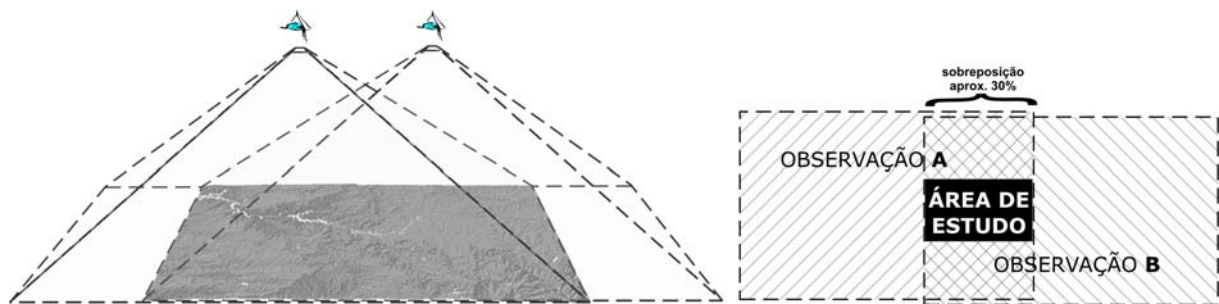


Figura 3.5 – Esquema para geração de anaglifos.

A percepção tridimensional também foi observada neste trabalho com o uso de uma técnica conhecida como ChromaDepth (Steenblik, 1987; Bailey e Clark, 1998). Utiliza, como no método anaglifo, um par de óculos para percepção de profundidade. A percepção tridimensional, entretanto, é dada pela capacidade dos óculos de utilizar difração para gerar uma sensação das cores vermelhas estarem mais próximas que as verdes e estas, por sua vez, mais próximas que as azuis. Desta forma são utilizados algoritmos simples de construção de mapas hipsométricos, com escala de cor variando do vermelho (regiões mais altas), passando pelo verde (altitudes intermediárias) e chegando ao azul (locais mais baixos). Sobrepondo esta imagem ao mapa pseudo-sombreado é gerado um mapa sombreado associado à percepção de profundidade. A visualização dos diferentes métodos utilizados para traçado de lineamentos com o SRTM90 pode ser observado na figura 3.6.

3.3 EXTRAÇÃO DE DRENAGENS A PARTIR DO MODELO SRTM90

A análise de dados de Modelos Digitais de Elevação (MDE) pode levar à obtenção de diversas informações sobre a morfologia de uma determinada paisagem. Os algoritmos de análise normalmente utilizam técnicas derivadas de operações de vizinhança para calcular parâmetros como declividade, aspecto do terreno, relevo sombreado, pontos de inflexão, entre outros (USGS, 1987; Bonham-Carter, 1995). Como a indicação de fluxos e a localização de canais de drenagem são

intimamente ligadas a tais parâmetros do terreno, podem-se obter, então, estes últimos através também de técnicas de vizinhança.

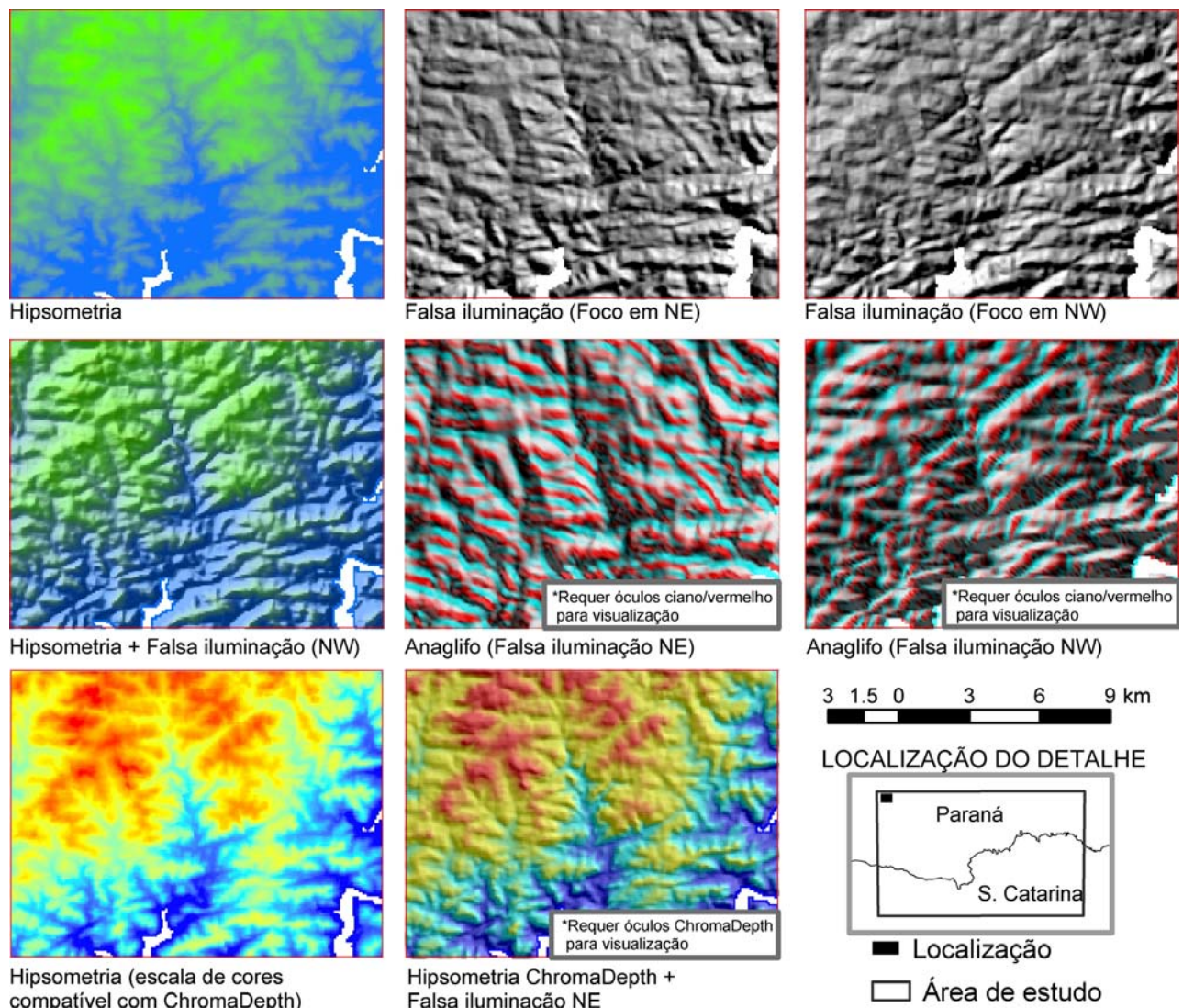


Figura 3.6 – Algumas visualizações adotadas para o modelo SRTM90.

A sequência de procedimentos para esta extração automatizada é indicada e detalhada por Jenson e Domingue (1988). A extração foi executada com o programa computacional GeomaticaTM 8.2, utilizando-se os módulos DWCON (*Drainage Watershed Conditioning*) e DRAIN (*Drainage Basin From Elevation Data*). Através da combinação dos dois módulos é gerada, então, uma rede representativa da drenagem.

O modelo SRTM90 foi convertido para grade no formato PIX (Figura 3.7a), padrão PCI. Subseqüentemente os dados de entrada são processados pelo módulo DWCON, que calcula os quatro seguintes parâmetros: FDEP (grade representativa do preenchimento de depressões), FDIRECT (grade representando a direção de fluxo), FACCUM (acumulação de fluxo) e Delta (a variação no fluxo). Este módulo não apresenta nenhum parâmetro de ajuste.

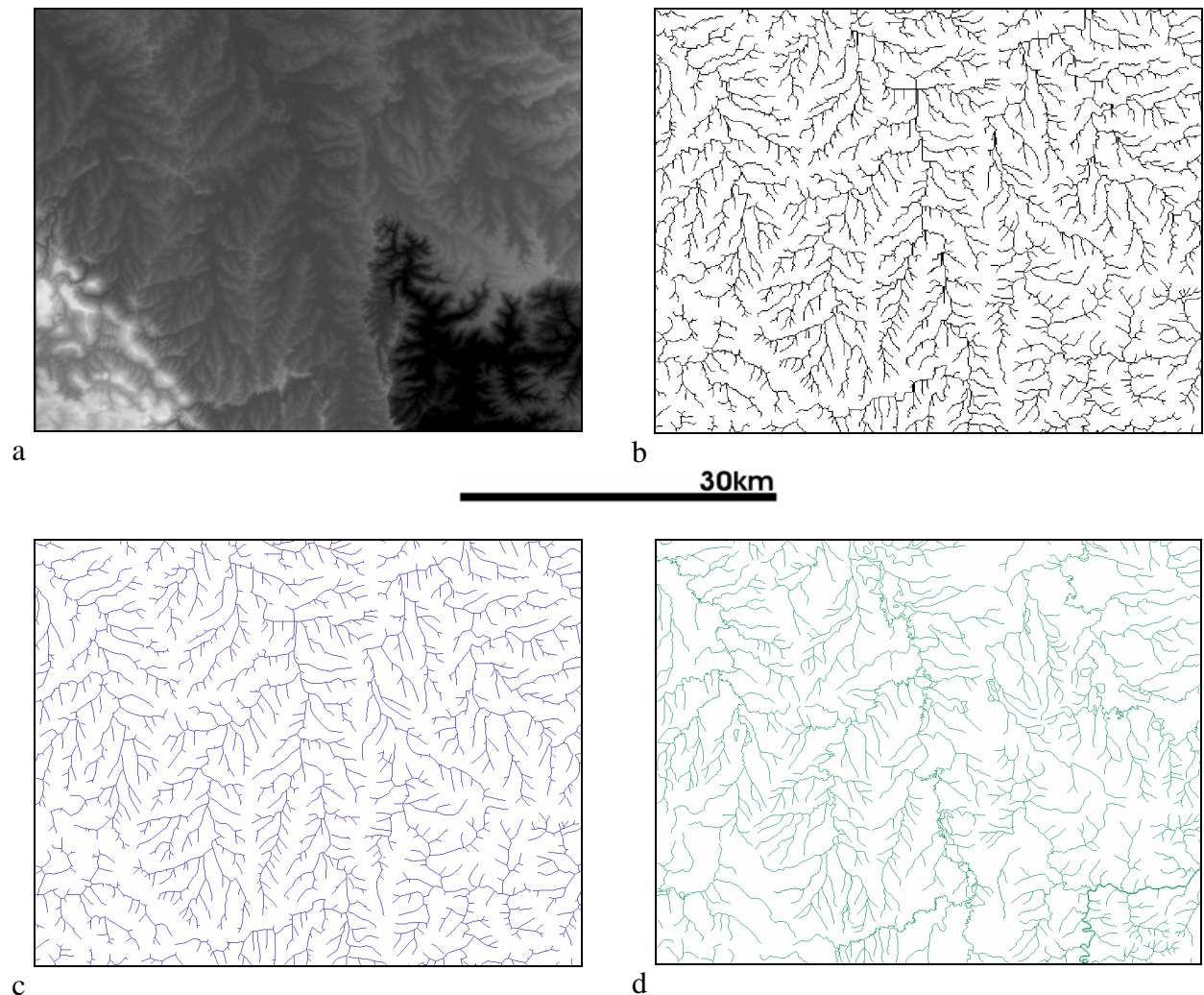


Figura 3.7 - Extração automatizada de drenagens a partir de MDE. a: Dado original SRTM90 (hypsométrico); b: Grade obtida a partir do MDE representando a drenagem; c: Drenagem extraída convertida em formato vetorial; d: Aspecto da drenagem em carta topográfica escala 1:100.000.

Para obtenção da rede de drenagem deve ser inserido o parâmetro de entrada referente ao limiar da análise (*drainage threshold*) no módulo DRAIN. O parâmetro serve como um filtro para os dados de acumulação, pré-processados pelo módulo DWCON. Somente os dados com valores de acumulação maiores que o parâmetro serão então analisados. Conforme se aumenta o valor deste limiar obtém-se menos ruído na imagem final, causados por ambigüidades no MDE, mas também se diminui a quantidade de canais de drenagem extraídos. Após a análise os resultados são gravados em formato de grade (Figura 3.7b). Foram testados valores para o limiar da análise até obter um ajuste próximo à rede de drenagem de uma carta topográfica em escala 1:100.000, como referência para qualidade (Figura 3.7d).

A última etapa é a conversão da grade de saída, representativa da rede de drenagem, em algum formato vetorial para posteriores análises (Figura 3.7c). O resultado obtido é aquele apresentado no capítulo anterior (ver figura 2.15).

3.4 PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS POTENCIAIS

Foram processados dados gravimétricos e magnetométricos visando auxiliar e dar sustentação à interpretação do arcabouço estrutural na área estudada. A partir do processamento destes dados foram interpretadas estruturas de subsuperfície através de técnicas específicas.

3.4.1 Dados gravimétricos

Os dados analisados são parte de um banco de dados integrado pela Universidade de São Paulo, com observações de campo obtidas conjuntamente com a Universidade Federal do Paraná, e foram gentilmente cedidos pela professora Márcia Quintas (UFPR, Dpto. de Geomática). Para este estudo, foram selecionados dados nos estados do Paraná e Santa Catarina (Figura 3.8), num total de 965 estações.

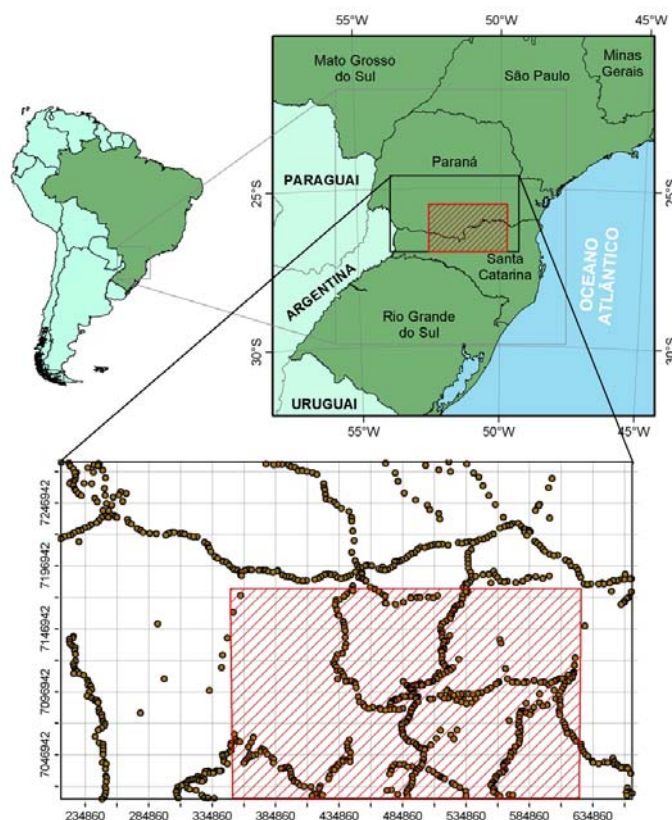


Figura 3.8 – Localização das 965 estações gravimétricas utilizadas (área de estudo achurada).

Para a geração dos mapas gravimétricos (*Bouguer* e *free-air*) foram utilizadas técnicas estatísticas de *krigagem*. São aqui indicados aspectos, tanto teóricos como práticos, dos métodos de análise empregados. A análise é executada com o módulo GeoR, inserido no programa

computacional de domínio público R (Rowlingson et al., 2003). No desenvolvimento, em um primeiro momento, foi procedida uma análise exploratória dos dados, visando dar embasamento à análise geoestatística subsequente. Segue-se aqui, de maneira adaptativa, um tutorial do pacote geoR (Ribeiro Jr., 2003a).

Análise exploratória dos dados

Foram adicionadas aos dados *free-air* e Bouguer as constantes 50 e 150, respectivamente, para facilitar operações logarítmicas, visto que os dados originais apresentavam valores negativos. Nas figuras 3.9a e 3.9b o primeiro gráfico (esquerda superior) mostra a distribuição espacial dos dados divididos em seus respectivos quartis (1º - Azul, 2º Verde, 3º Amarelo e 4º Vermelho). O gráfico superior à direita e inferior à esquerda mostram a variabilidade dos dados para as coordenadas x e y, respectivamente. O gráfico inferior à direita mostra o histograma dos dados analisados. Os espalhamentos dos dados, nos diagramas, não demonstram tendências regionais claras para os dados *free-air* e Bouguer. Nota-se também distribuição normal para os dados, com uma cauda de dispersão um pouco maior para os dados Bouguer em seus valores maiores.

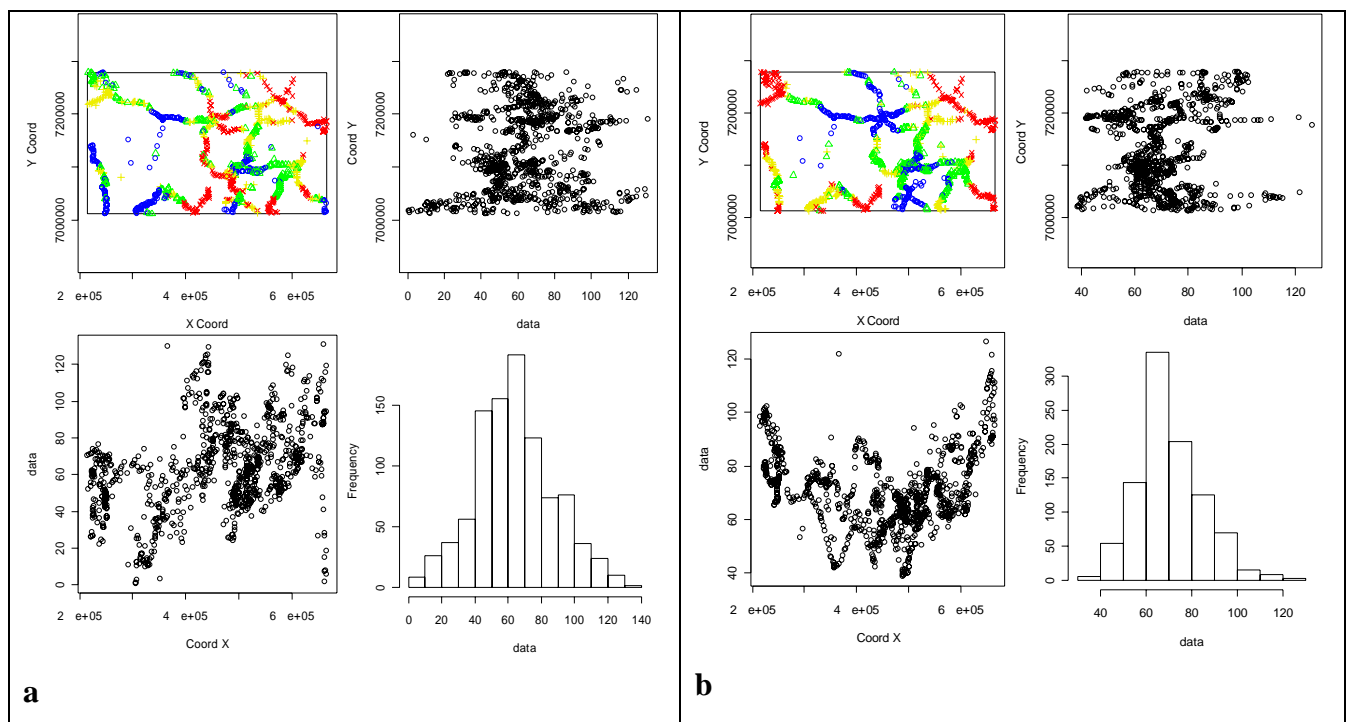


Figura 3.9 – Alguns aspectos estatísticos dos dados *free-air* (a) e Bouguer (b).

Análise geoestatística para os dados *free-air*

Em um primeiro momento foi executada a transformação *boxcox* para seleção do parâmetro *lambda*. A ideia baseia-se em aproximar o máximo possível os dados de uma distribuição normal, e aproximar a distribuição dos erros para todas as amostras. A transformação consiste em aplicar a

expressão abaixo (Equação 3.1), para calcular o parâmetro λ a ser estimado a partir dos dados originais.

$$y' = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}, \quad \text{Equação 3.1}$$

O parâmetro λ (*lambda*), estimado a partir de y (dados originais) deve ser calculado maximizando a função indicada. A função *boxcox* do pacote MASS (Rowlingson et al., 2003) calcula a verossimilhança perfilhada no parâmetro *lambda*. Escolhe-se então para *lambda* o valor que maximiza esta função. Através do gráfico abaixo (Figura 3.10) observa-se que, para uma probabilidade de 95%, este parâmetro está entre 0,8 e 1.

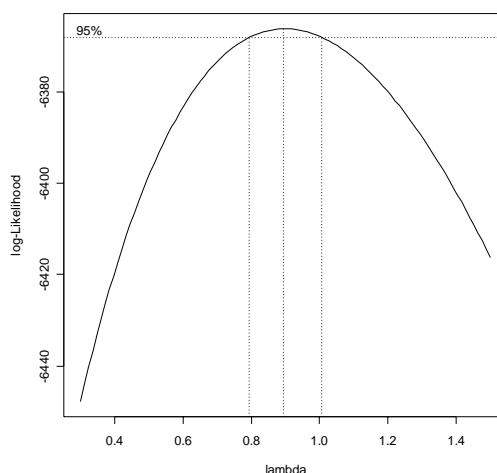


Figura 3.10– Verossimilhança perfilhada no parâmetro *lambda* calculada com a função *boxcox*.

Para construção do semi-variograma foram selecionados valores de *lambda* igual a 1 e distância de análise de 260 km, que é o comprimento do menor lado da área de estudo.

Outra função disponível no pacote GeoR é relacionada à construção de um envelope ou janela, no semi-variograma, para indicar se há presença de dependência espacial (Ribeiro Jr. e Diggle, 2003). O envelope é calculado assumindo um modelo aleatório gaussiano. São então simulados valores nas posições dos dados e são calculados diversos semi-variogramas empíricos. A partir dos semi-variogramas empíricos observam-se as diferenças com o semi-variograma original. Com as diferenças mínimas e máximas são então plotadas as janelas. O semi-variograma e esta janela (calculada a partir de 99 simulações) são mostrados no próximo gráfico (Figura 3.11). O espalhamento dos dados fora da janela indica que há dependência espacial para os valores.

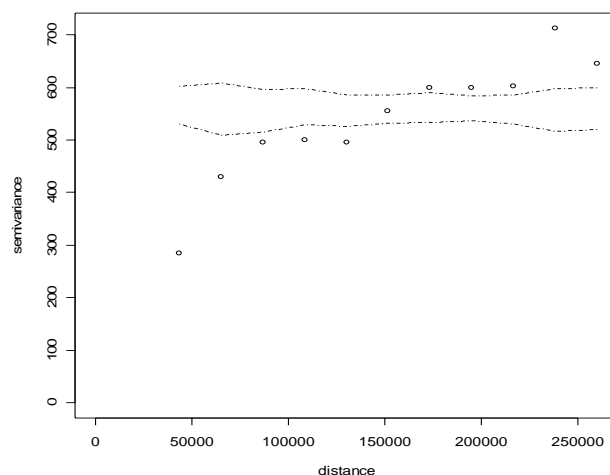


Figura 3.11 – Indicação de dependência espacial. Nota-se que os pontos não se encontram dentro da janela (linha pontilhada), sugerindo presença de dependência espacial.

Os semi-variogramas direcionais (Figura 3.12) indicam que não há tendências direcionais acentuadas para os dados. A construção foi feita para as direções indicadas e o ângulo de tolerância é de 22,5 graus para cada direção. Para a obtenção dos parâmetros de *krigagem* foi então utilizada a variografia omnidirecional.

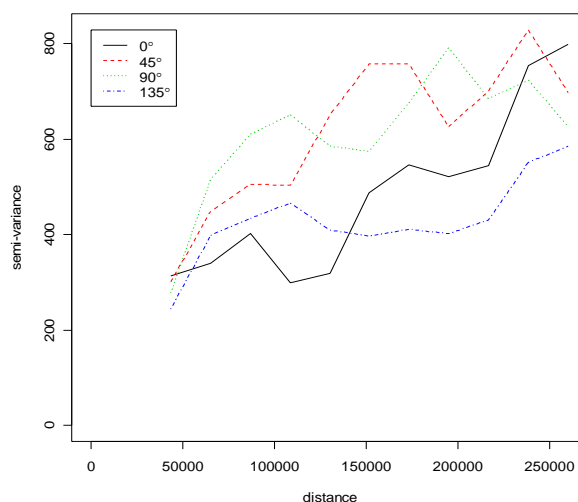


Figura 3.12 – Semi-variogramas direcionais.

Foram elaboradas duas curvas de ajuste para o semi-variograma através dos métodos *Matérn* (ou modelo K-Bessel, que apresenta a característica de suavizar, localmente, a superfície interpolada, em relação a outros modelos, e.g. exponencial ou esférico) e dos mínimos quadrados (Ribeiro Jr., 2003b). Os parâmetros encontrados estão indicados na tabela 3.4.

	τ^2 (E. Pepita)	ζ^2 (Patamar)	ϕ^2 (Alcance)
Mínimos Quadrados	173,7252	558,5214	126110,3133
Matérn	300.5722	385.2010	53827.1954

Tabela 3.4 – Parâmetros para ajuste ao semi-variograma pelos métodos dos mínimos quadrados e *Matérn*.

As curvas ajustadas usando os parâmetros obtidos, bem como os envelopes calculados (com 99 simulações) podem ser observados nas figuras 3.13a e 3.13b.

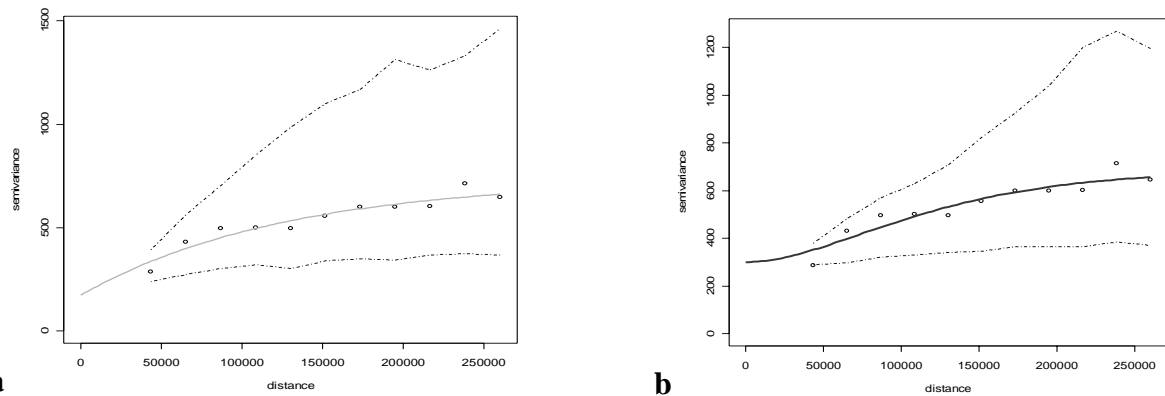


Figura 3.13 – Curva ajustada e envelope simulado através do modelo dos mínimos quadrados (a) e modelo *Matern* (b).

Para a predição espacial através do método de krigagem, foi definida uma malha com 50 pontos nas coordenadas em X e 30 pontos nas coordenadas em Y. A comparação das *krigagens* executadas através dos dois modelos, mínimos quadrados e *Matern*, pode ser observada na figura 3.14. O gráfico da figura 3.15 compara também os dois modelos. Os valores preditos pelo modelo *Matérn* estão dispostos no eixo das ordenadas e os dados do modelo dos mínimos quadrados no eixo das abscissas. A linha deste gráfico representa um ajuste teórico ótimo para os dados. Nota-se que as respostas dos dois modelos apresentam correlação acentuada para a maioria dos pontos preditos.

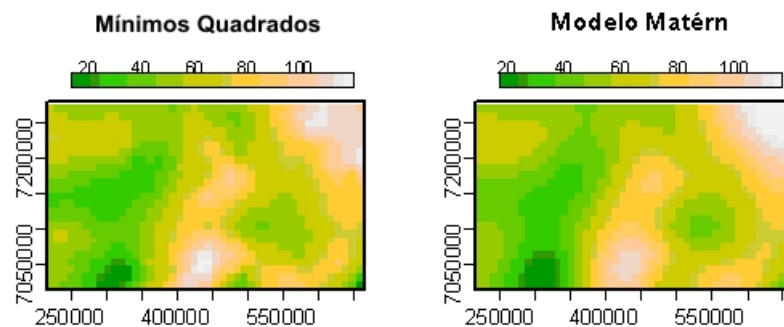


Figura 3.14 – Comparação das *krigagens* executadas com os dois diferentes métodos utilizados.

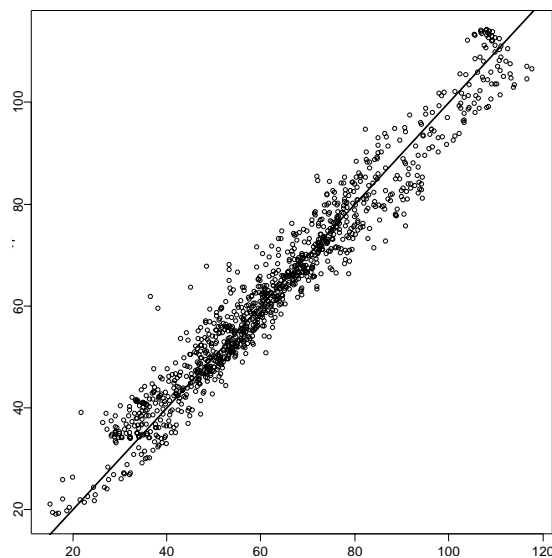


Figura 3.15 – Relação dos dados obtidos pelos dois modelos utilizados.

No eixo das ordenadas os valores obtidos pelo modelo *Matérn* e nas abscissas pelo modelo dos mínimos quadrados.

Análise geoestatística para os dados Bouguer

Para construção do semi-variograma foram selecionados valor de λ como 0,18 (indicado por transformação *boxcox* – Figura 3.16) e distância de análise como 260 km (menor distância do retângulo envolvente). O semi-variograma construído para os dados Bouguer pode ser observado na figura 3.17, juntamente com a janela indicando presença de dependência espacial para os dados. Através da construção dos semi-variogramas direcionais não se nota dependência clara para diferentes direções analisadas (Figura 3.18).

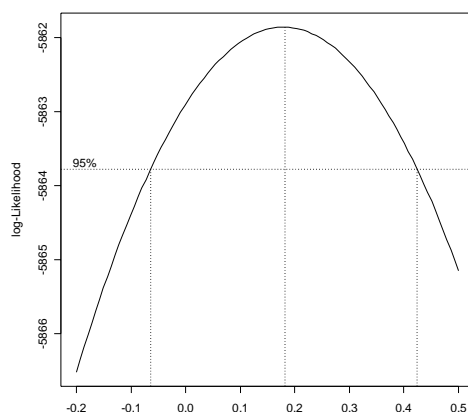


Figura 3.16 – Indicação do parâmetro λ a partir de transformação *boxcox*.

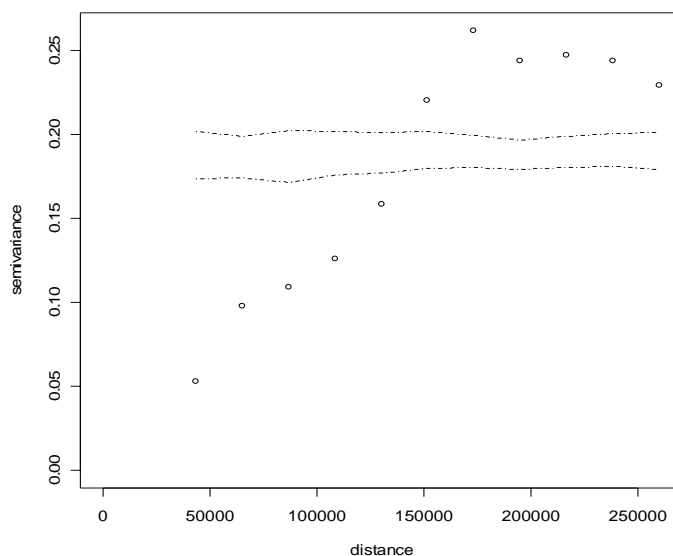


Figura 3.17 – Semi-variograma para os dados Bouguer. Notar que a janela montada a partir de 99 simulações indica dependência espacial para o conjunto de dados.

Também foram ajustadas curvas pelo método dos mínimos quadrados e pelo modelo *Matérn*. Os parâmetros para *krigagem* obtidos encontram-se na tabela abaixo.

	τ^2 (E. Pepita)	ζ^2 (Patamar)	ϕ^2 (Alcance)
Mínimos Quadrados	0	0,3676	200000
Matérn	0,0979	0,687	200000

Tabela 3.5 – Parâmetros para ajuste ao semi-variograma pelos métodos dos mínimos quadrados e *Matérn*.

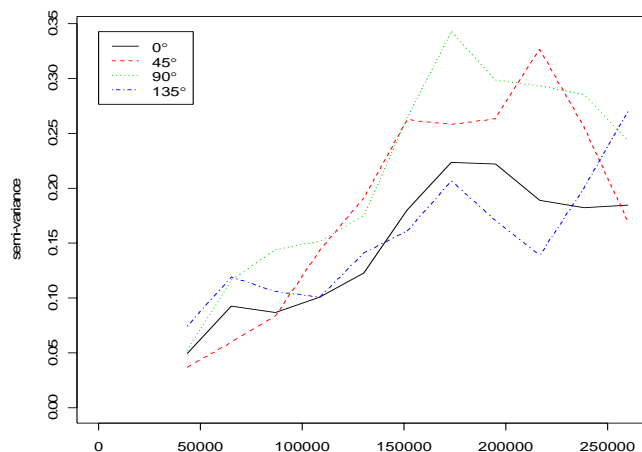
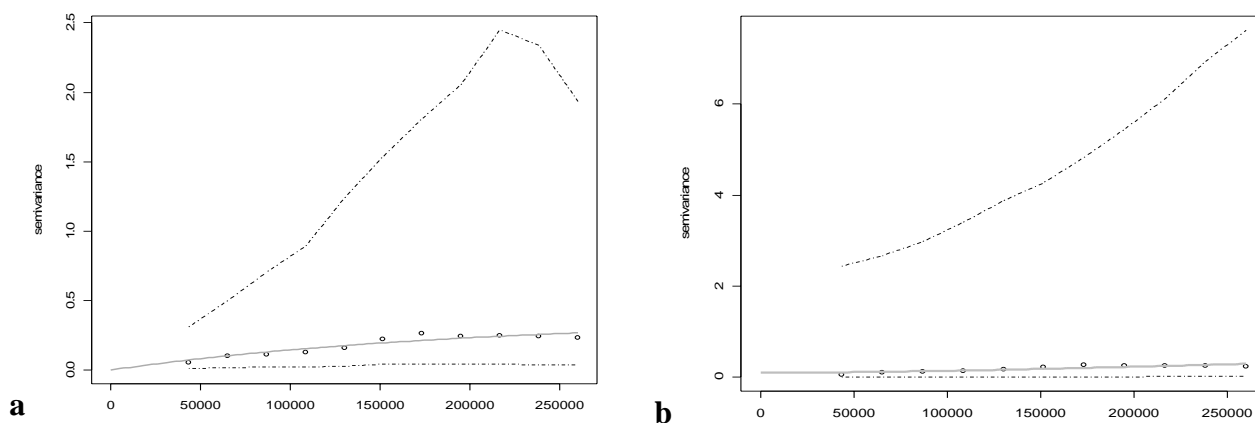
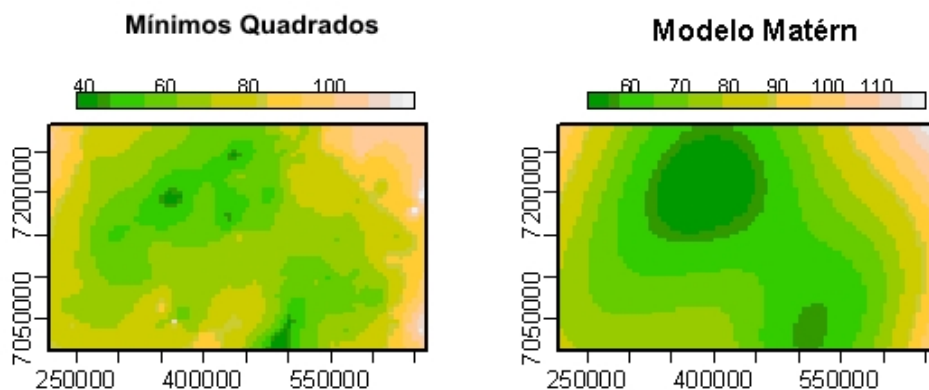


Figura 3.18 – Semi-variogramas direcionais.

As curvas ajustadas pelos dois modelos, bem como os envelopes calculados a partir de 99 simulações, podem ser observados nas figuras 3.19a e 3.19b.

Figura 3.19 – Curva ajustada e envelope simulado através do modelo dos mínimos quadrados (a) e *Matérn* (b).

A malha definida para predição foi de 100 pontos nas coordenadas X e 60 pontos nas coordenadas Y. Os mapas interpolados pelos dois modelos descritos podem ser observados na figura 3.20. O gráfico da figura 3.21 compara os dois modelos. Os valores preditos pelo modelo *Matérn* estão dispostos no eixo das ordenadas e os dados do modelo dos mínimos quadrados no eixo das abscissas.

Figura 3.20 – Comparação das *krigagens* executadas com os dois diferentes métodos utilizados.

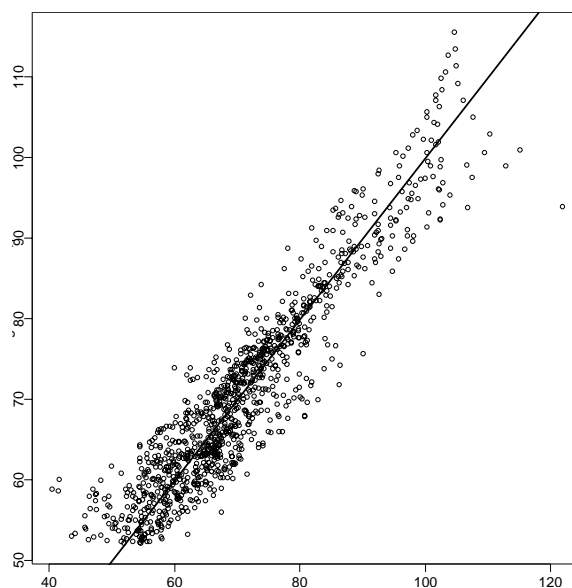


Figura 3.21 – Relação dos dados obtidos pelos dois modelos utilizados.

No eixo das ordenadas os valores obtidos pelo modelo *Matérn* e nas abscissas pelo modelo dos mínimos quadrados.

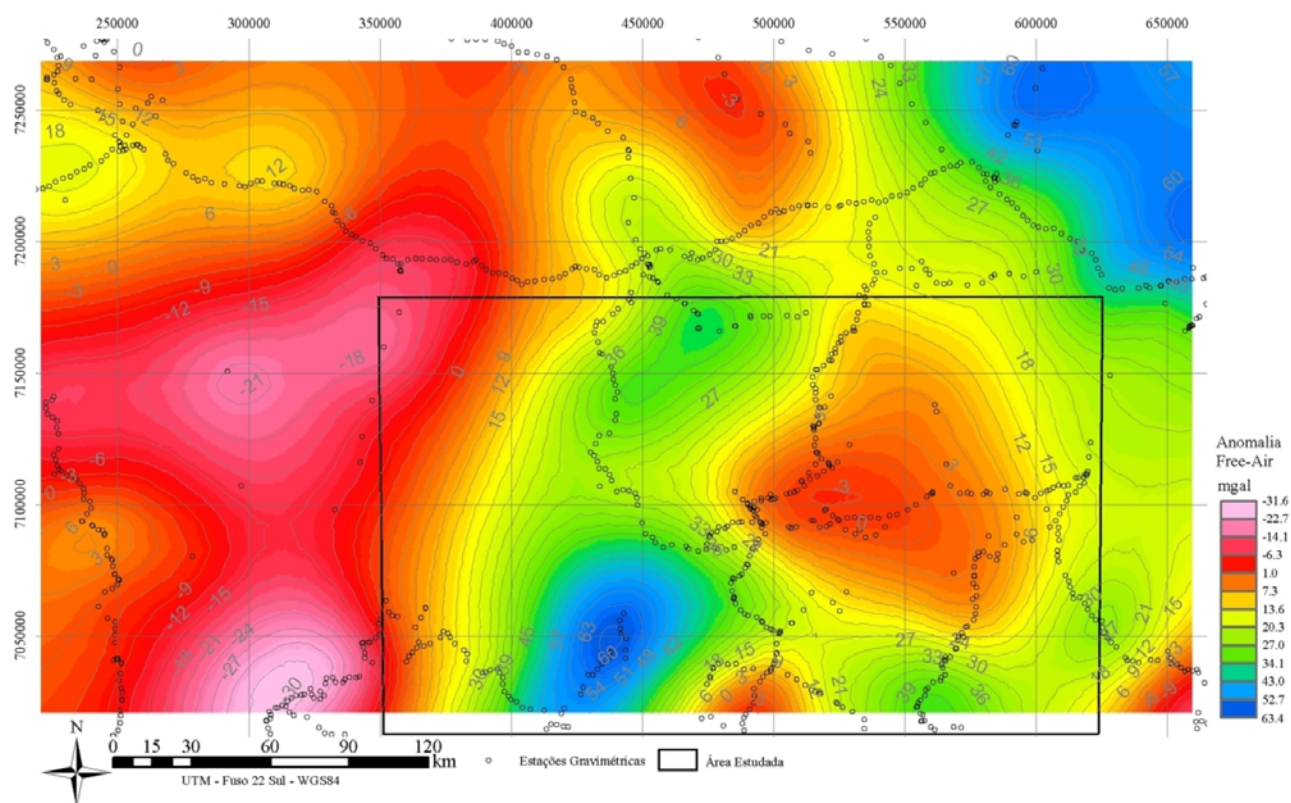
Uma comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos também pode ser observada na tabela 3.6, onde se encontram alguns valores estatísticos dos dados originais e daqueles calculados através dos diferentes ajustes. Nota-se uma maior semelhança entre os dados originais e aqueles calculados pelo método dos mínimos quadrados.

	Dados Originais	Mín. Quadrados	Modelo Matérn
Média	70.357	70.811	70.903
Variância	204.831	172.729	158.621
Desvio Padrão	14.312	13.143	12.594
Mediana	68.350	68.744	68.507
Máximo	126.560	118.612	118.163
Mínimo	38.610	39.315	52.055

Tabela 3.6 – Parâmetros estatísticos dos dados originais e calculados.

Os mapas *free-air* e Bouguer, gerados a partir dos parâmetros indicados, podem ser observados na figura 3.22 (mapas com maiores detalhes no anexo 2).

MAPA FREE-AIR



MAPA BOUGUER

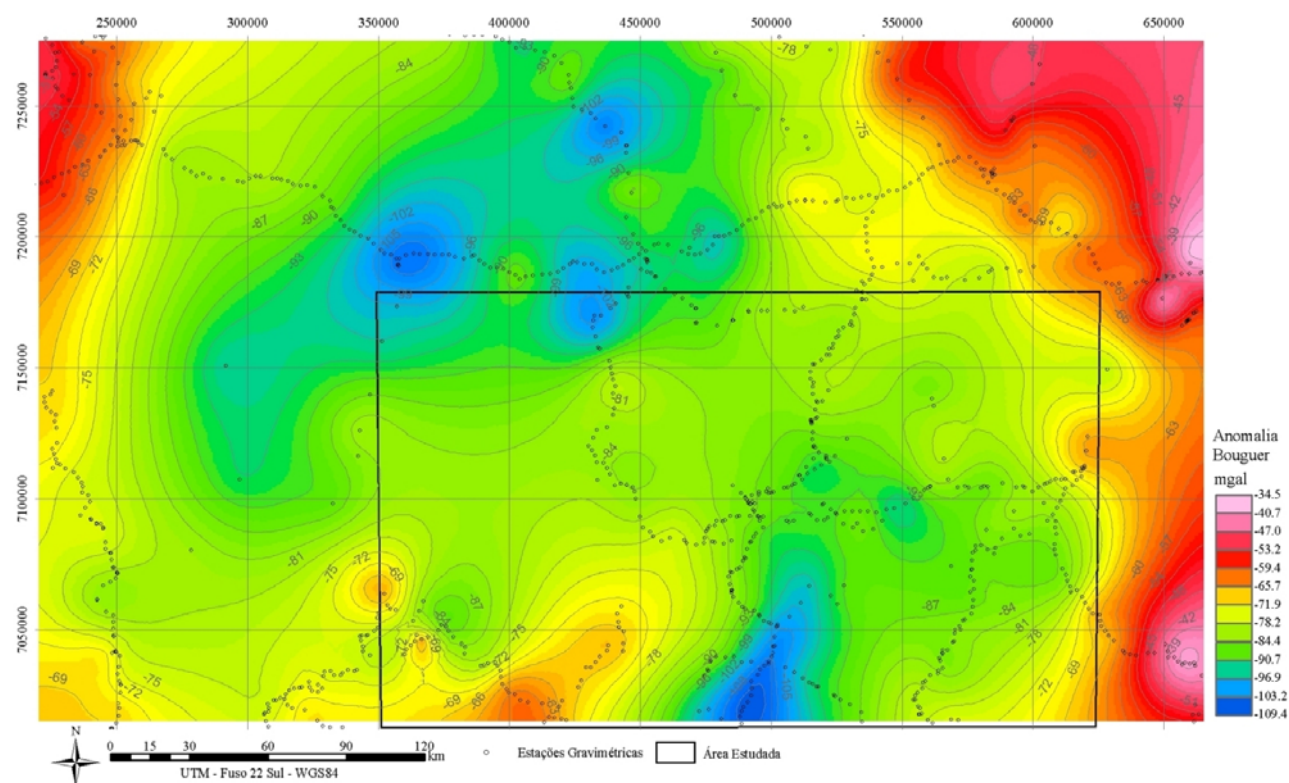


Figura 3.22 – Mapas das anomalias *free-air* e Bouguer.

3.4.2 Dados Magnetométricos

A grade de dados utilizada neste trabalho é limitada pelas coordenadas 52°30'W a 49°30'W e 27°15'S a 25°15'S. Os dados são referentes a uma compilação de quatro diferentes levantamentos (Figura 3.23). Os dados foram gentilmente cedidos pelo professor Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR, Dpto. de Geologia).

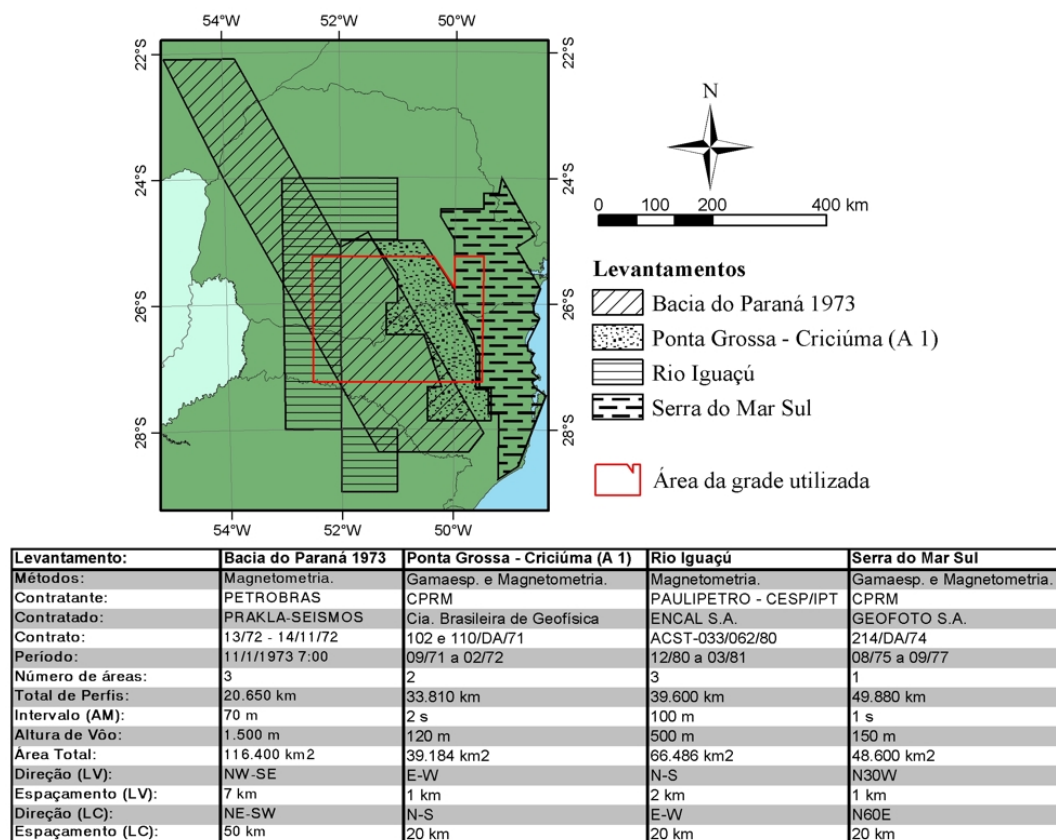


Figura 3.23 – Localização dos levantamentos aéreos compilados e alguns dados técnicos.

Os dados da grade obtida (Figura 3.24) representam a anomalia residual, em nanoTeslas, corrigida do IGRF e micronivelados, interpolados para uma malha regular de 1x1 km e filtrados com continuação ascendente de também 1 km.

Processamentos executados

Em um primeiro momento foi executado procedimento para obtenção do sinal analítico. O resultado mostra claramente problemas de nivelamento dos dados no pré-processamento. As direções das linhas de voo (NW-SE na porção do levantamento Bacia do Paraná 1973) ficam bastante destacadas através da observação do sinal analítico (Figura 3.25).

Foi também executado procedimento para obtenção do espectro de potência radial, a fim de estimar as profundidades aproximadas das anomalias. O resultado, entretanto, não apresentou coerência, assim não sendo possível indicar as profundidades das fontes para a grade disponível.

Foram ainda executadas tentativas para micronivelamento dos dados originais através das técnicas de Minty (1991) e GEOSOFT (2001), porém os resultados não foram satisfatórios.

Outra etapa de processamento dos dados magnetométricos foi relativa a filtragens em continuações ascendentes, e a partir destas continuações a construção de mapas do sinal analítico. A continuação para cima visa excluir os sinais de menor comprimento de onda, referentes a fontes mais rasas, desta forma realçando aquelas geradas por anomalias de maior profundidade. Já o sinal analítico apresenta a característica de centralizar o sinal sobre a anomalia que o gera. Foram elaboradas continuações em 500, 1000, 2000 e 4000 metros a partir dos dados da grade original e seus respectivos sinais analíticos (ver figura 3.25).

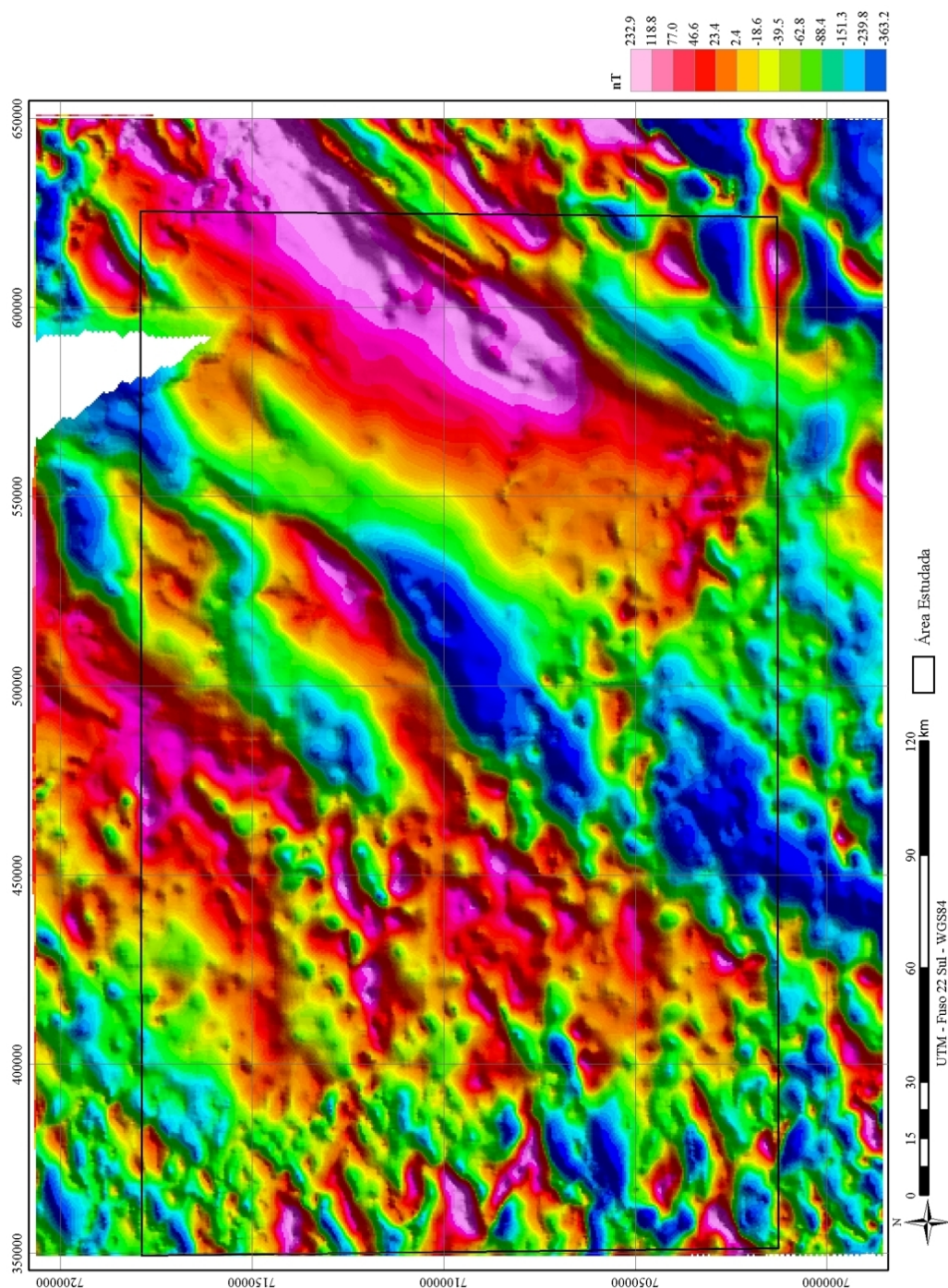


Figura 3.24 – Mapa Magnetométrico Residual com iluminação NW e localização da área de estudo.

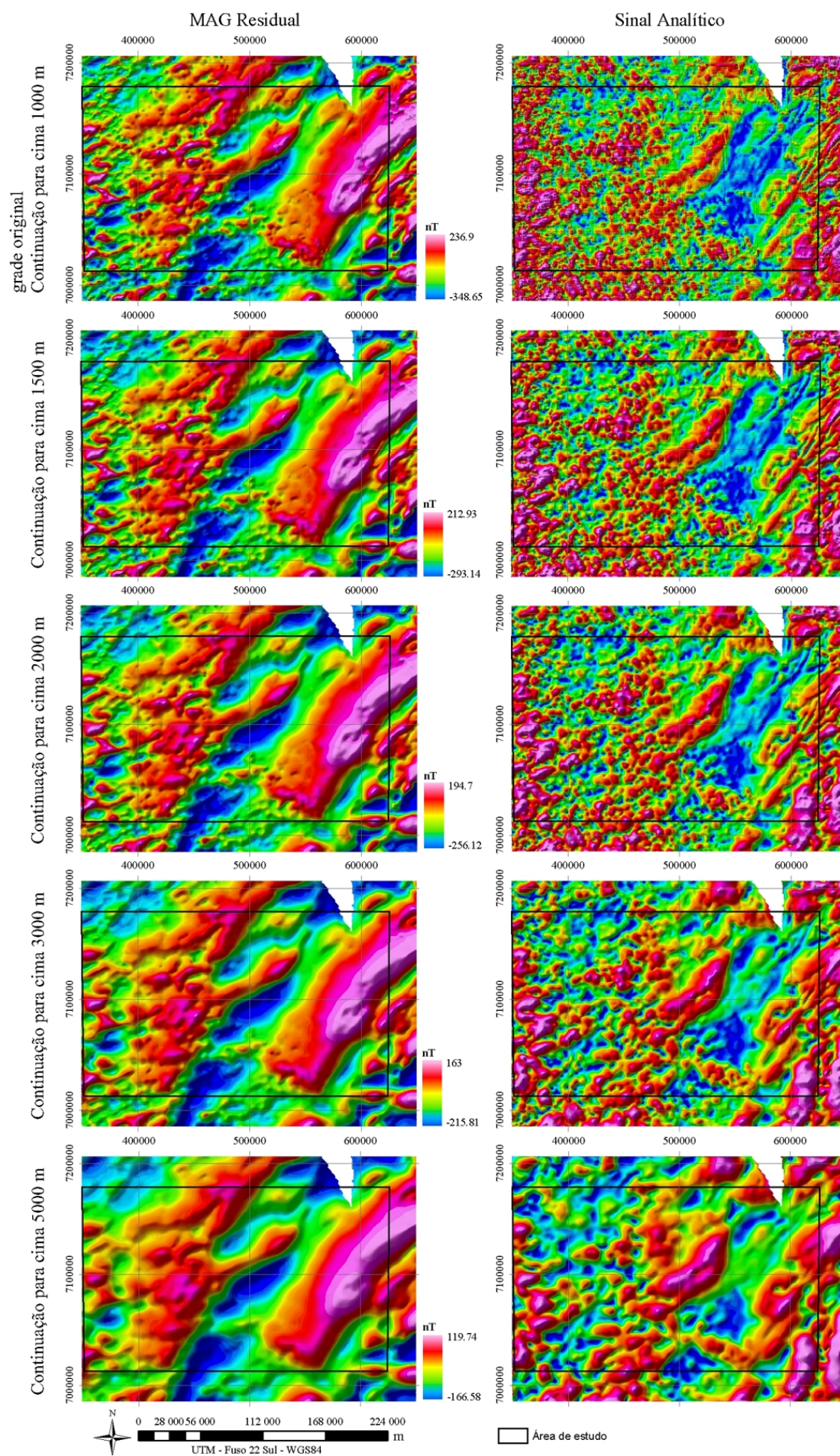


Figura 3.25 – Continuações ascendentes e respectivos sinais analíticos.

Os procedimentos para obtenção do sinal analítico e do espectro de potência radial utilizados, bem como para continuação para cima foram executados com o programa computacional Oasis MontajTM – pacote MAGMAP. Todos os métodos de processamento usados encontram-se detalhados em Portela Filho (2003).

3.5 LEVANTAMENTOS DE DADOS DE CAMPO

Visando dar subsídios a uma análise cinemática, foram executadas 4 etapas de campo, perfazendo um total de 55 pontos levantados (Figuras 3.26). Estes levantamentos tiveram como objetivo a coleta de dados relacionados a atitudes de estruturas rúpteis em diversos níveis estratigráficos e diferentes posições geográficas.

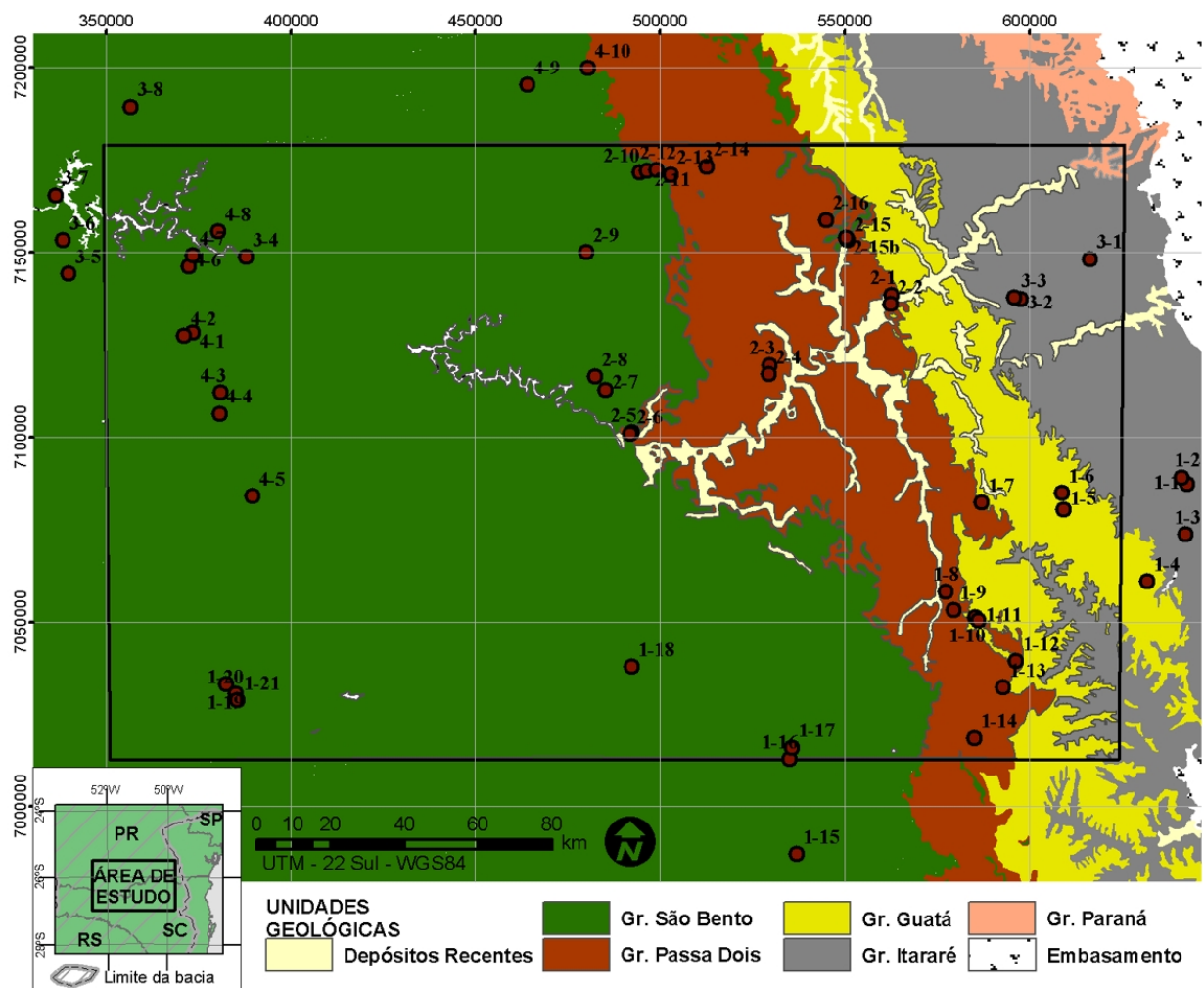


Figura 3.26 – Localização dos pontos levantados. A área de estudo encontra-se destacada.

Foram no total coletadas cerca de 830 atitudes de planos de fraturas e cerca de 90 indicadores cinemáticos. Os indicadores cinemáticos observados referem-se a falhas com estrias/degraus e fraturas escalonadas. Após sua coleta os dados foram compilados em planilha. Os diagramas estruturais foram elaborados nos programas StereoNetTM 3.03 (Geological Software) e Sigmas (ver capítulo 4 deste trabalho).

4 IMPLEMENTAÇÃO DE APLICATIVOS

Visando auxiliar as análises dos dados levantados foram desenvolvidos dois programas computacionais, apresentados neste capítulo. São aqui revisadas as técnicas analíticas, descritos os métodos e também é demonstrada a implementação destes dois programas. O primeiro programa é relacionado a uma compilação de diversos métodos analíticos para os lineamentos obtidos com os sensores remotos. O segundo aplicativo implementado refere-se ao cálculo e visualização de paleotensores a partir de dados de falhas obtidos em campo.

4.1 AUXÍLIO COMPUTACIONAL À ANÁLISE DE LINEAMENTOS

Devido à crescente disponibilidade de dados obtidos por sensores remotos passíveis de análises geológico-estruturais, nota-se a necessidade de metodologias que otimizem investigações deste tipo, gerando respostas que facilitem e/ou simplifiquem sua compreensão. A facilidade de análises de imagens e dados de diversas origens em programas computacionais (Sistemas de Informações Geográficas - SIG), e posterior vetorização destes dados estruturais interpretados, gera arquivos de traçados que podem então ser estudados através de técnicas distintas. A grande disponibilidade de SIG's programáveis torna possível a geração de extensões para estes pacotes, onde os dados interpretados são convertidos para expressões numéricas e então tratados através de diversos parâmetros relativos à sua geometria.

Utilizando-se técnicas estatísticas específicas, pode-se então estimar a validade dos dados obtidos e indicar de maneira mais ponderada a relação dos dados interpretados com a realidade geológica da região analisada.

Alguns programas computacionais, comerciais ou de domínio público, disponibilizam ferramentas para determinadas análises a partir de traços de lineamentos. Entre estes podem ser citados RockWorksTM (RockWare, 2004), ArcMapTM – Pacote Spatial Analyst (ESRI, 2002) e Spring (INPE, 2004). As análises são, entretanto, normalmente limitadas a um único método. No Pacote Spatial Analyst, por exemplo, fazem-se apenas análises quanto à densidade de lineamentos, enquanto no ambiente Rock-Works são interpolados, a partir de uma área de busca determinada pelo usuário, frequência e comprimento acumulado, ponderando apenas a característica de presença ou não do lineamento em determinada célula analisada. No programa Spring o método de análise é o mesmo indicado para o programa Rock-Works.

Partindo destas premissas, foi criado um programa computacional (LinAnalyst v. beta1) visando facilitar a compreensão de dados obtidos a partir de traçados de lineamentos obtidos por sensores remotos (de Freitas et al., 2004). O programa, como demonstrado mais adiante, apresenta três métodos analíticos distintos para geração de grades com atributos diversos referentes aos

lineamentos processados. Apresenta também características referentes a análises direcionais (através da geração de diagramas de rosetas) para todo o banco de dados ou a partir da divisão do banco de dados em células individuais, além da geração de relatórios com parâmetros estatísticos para os dados.

4.1.1 Revisão de alguns conceitos

Devido a inconsistências e ambigüidades encontradas na literatura, são aqui revistas algumas definições de parâmetros utilizados nas análises de lineamentos:

Densidade é comumente tratada como o número de segmentos isolados de fraturas, relacionadas a uma unidade de comprimento, área ou volume, para análises em uma, duas ou três dimensões, respectivamente. Entretanto, estas são quantidades dependentes de escala, e propõe-se então o uso do termo densidade aparente para esta relação acima mencionada (Rohrbaugh Jr. *et al.*, 2002). Para o parâmetro de densidade, os mesmos autores indicam que é mais correta a utilização de um amostrador como, por exemplo, o centróide da fratura, que seria então relacionado a uma unidade de comprimento, área ou volume.

O **tamanho** é descrito em uma, duas e três dimensões, como comprimento, área e volume de fraturas, respectivamente (Rohrbaugh Jr. *et al.*, 2002). Em fraturas conectadas a análise pode considerar segmentos isolados ou conjuntos de segmentos, para tanto é necessária uma análise da influência desta relação no modelo proposto durante a análise.

A **intensidade** de fraturas incorpora características tanto da densidade como do tamanho. É definida como o número de fraturas por unidade de comprimento da amostragem, comprimento das fraturas por unidade de área da amostragem ou ainda área de fraturas por unidade de volume do maciço rochoso analisado, para modelos em uma, duas ou três dimensões, respectivamente (Rohrbaugh Jr. *et al.*, 2002).

Nas análises relativas à **orientação** espacial destas feições utiliza-se a relação angular do traçado do elemento, na superfície analisada, com uma direção padrão, norte p.e. (Tsoutrelis *et al.*, 1990; Rohrbaugh Jr. *et al.*, 2002), e no caso de modelos tridimensionais incrementa-se a esta direção um ângulo de mergulho com relação a uma superfície de referência. Dentro de modelos mais avançados, por vezes chamados de modelos 4D, insere-se a rotação de determinada fratura ou conjunto de fraturas, com relação a diferentes momentos.

4.1.2 Alguns parâmetros passíveis de análise em modelos bidimensionais

Caracterizam-se como modelos 2D, ou bidimensionais, fraturas interpretadas ou traçadas sobre elementos de representação planares ou semi-planares, como fotografias aéreas ou painéis

fotográficos de afloramentos, imagens de satélite, modelos digitais de elevação, mapas geológico-estruturais, entre outros (Northfleet et al. 1971; Tsoutrelis et al., 1990). Alguns, dentre os diversos parâmetros utilizados em análises de fraturas, são aqui discutidos.

Orientação

Os elementos interpretados ou traçados são associados a um azimute ou rumo. Este atributo pode ser utilizado para segmentação dos diversos elementos em classes de direções. O agrupamento pode ser feito para toda a área de estudo, como para regiões distintas devido a aspectos geológicos ou interpretativos. Os outros parâmetros de análise podem ser também executados para cada grupo direcional individualmente. A análise da orientação deve ser bastante cautelosa quando executada em painéis fotográficos derivados de paredes de afloramentos. Devido a diversos cortes possíveis, o ângulo de mergulho pode ser alterado, visto que apenas o corte perpendicular à estrutura em questão gera o ângulo de mergulho verdadeiro para esta.

Comprimento dos traços

Nas análises podem ser considerados apenas segmentos retilíneos, constituídos por dois pontos extremos, ou vários segmentos retilíneos associados. Dentro das análises tradicionalmente executadas são considerados apenas segmentos retilíneos, tanto por motivo de simplificação do modelo matemático aplicado como para adequação a definições conceituais. Os conceitos de lineamentos e alinhamentos, voltados à interpretação, também destacam apenas segmentos retilíneos. Muitas vezes, então, após a interpretação, deve-se tomar a cautela de seccionar elementos múltiplos.

Espaçamento dos Traços

É caracterizado como a distância linear entre dois traços adjacentes. Pode ser analisado individualmente, traço a traço, através de linhas de busca, ou ainda em áreas com relações matemáticas mais complexas, envolvendo a região de busca, frequência dos traços e seus ângulos. No caso do uso de linhas de busca devem ser utilizados diversos ângulos para estas, visando reduzir os erros devidos à não perpendicularidade entre as direções principais das estruturas.

Densidade dos Traços

Como discutido anteriormente, a densidade é calculada a partir de um elemento conhecido da fratura, como por exemplo, centróide, visando a retirada do fator de influência da escala de análise. Pode ser avaliada com relação à frequência acumulada para uma determinada área ou, com relação ao comprimento acumulado para a região.

Conectividade ou Interseção de Traços

Através das interseções de traços é possível ponderar um índice de conectividade para a área estudada. Deve ser dada, entretanto, atenção especial para estas feições durante a interpretação devido à erosão ou intemperismo diferencial, os quais facilmente mascaram este aspecto.

Rugosidade

Dentro das análises para elementos obtidos por sensores de maiores escalas, como fotos aéreas em vôos baixos ou painéis de afloramentos, é possível executar uma análise de rugosidade, ou não linearidade, dos traçados de fraturas. O método baseia-se na comparação dos traçados com os perfis de rugosidade estipulados por Barton e Choubey (1977, apud Tsoutrelis et al., 1990).

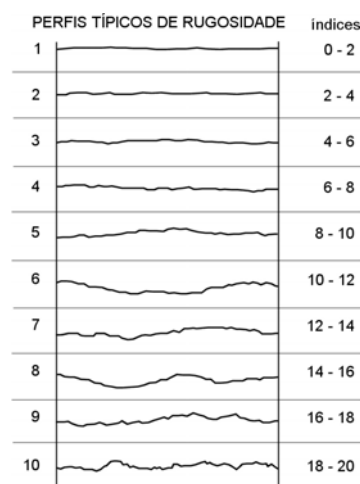


Figura 4.1 – Perfis e índices de rugosidade ou JRC (*Joint Roughness Coefficient*).
Modificado de Barton e Choubey (1977, apud Tsoutrelis et al., 1990).

Outros parâmetros

Através de relações, diretas ou não, entre os parâmetros indicados acima, é possível a obtenção de diversos outros parâmetros e índices geométricos dos traçados analisados. Entre estes está a intensidade, que se assemelha à densidade de traços quando tratada com relação ao comprimento acumulado, porém é relacionada apenas ao comprimento encontrado dentro da área amostrada (Rohrbaugh Jr. et al., 2002). Cabe também citar o índice de rocha intacta, ou não fraturada, que é calculado a partir do espaçamento de traços em relação a um amostrador linear. Este índice (*RQD Index*) foi proposto por Deere (1964, apud Tsoutrelis et al., 1990) e é obtido pela seguinte equação:

$$RQD = 100 \cdot \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n x_i$$

Equação 4.1 – Índice RQD de Deere (1964).

onde L é o comprimento do amostrador (linha de busca), x_i é o comprimento de cada unidade de rocha intacta acima de um valor limite (no caso de afloramentos usa-se 0,1 metros) e n é o número de ocorrências de unidades intactas.

4.1.3 Modelos analíticos

São revistas aqui técnicas propostas em três trabalhos que tratam de métodos analíticos utilizados no auxílio à interpretação de lineamentos obtidos a partir de imagens. A apresentação da revisão é feita por ordem cronológica, e os termos usados são aqueles apontados no início do trabalho.

No trabalho de Northfleet et al. (1971), são indicadas equações utilizadas para análises de fraturas a partir de lineamentos obtidos por fotointerpretação. Para a análise, cada lineamento é descrito por seus pontos extremos, como indicado na figura 4.2. O método utiliza-se de análise em grades regulares, onde cada lineamento pode ou não estar inteiramente inserido, e a partir do qual são atribuídos valores para as células.

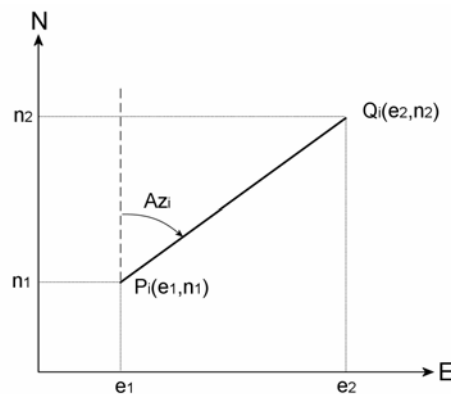


Figura 4.2 – Caracterização numérica dos lineamentos.
Modificado de Northfleet et al. (1971).

As análises são basicamente para azimutes e comprimentos dos lineamentos dentro destas células. O cálculo dos azimutes individuais é feito através da equação abaixo:

$$Az_i = \text{Arctg} \frac{e_2 - e_1}{n_2 - n_1}; az_i = 2Az_i,$$

Equação 4.2 – Azimute do lineamento.

onde Az_i é o azimute para cada lineamento e os termos n e e são os valores dos extremos nos eixos norte e leste, como indicado na figura 3. O termo az_i é usado para o cálculo do valor médio dos azimutes.

O valor do comprimento é obtido a partir da relação de Pitágoras para triângulos retângulos,

$$D_i = \overline{P_i Q_i} = \sqrt{(e_2 - e_1)^2 + (n_2 - n_1)^2}.$$

Equação 4.3 – Comprimento do lineamento.

Para tomada do valor médio dos azimutes dentro de uma célula, Pincus (1956, apud Northfleet et al., 1971) indica a fórmula,

$$\overline{Az} = \text{Arctg} \left(\frac{\sum_i \text{sen } az_i}{\sum_i \text{cos } az_i} \right); Az_R = \overline{Az} / 2.$$

Equação 4.4 – Valor médio dos azimutes.

A magnitude da resultante dos azimutes, que indica a dispersão destes, é calculada através da equação que segue:

$$R = \sqrt{\left(\sum_i \text{sen } az_i \right)^2 + \left(\sum_i \text{cos } az_i \right)^2},$$

Equação 4.5 – Dispersão dos azimutes.

onde R é a dispersão dada em graus. Para calcular esta dispersão em porcentagem indica-se o uso da equação:

$$L = (R / n).100,$$

Equação 4.6 – Porcentagem da dispersão dos azimutes.

com n representando o número total de lineamentos.

No mesmo trabalho os autores indicam para o cálculo da frequência em cada célula uso do número de fraturas dividido pela área desta célula. Já a densidade é calculada pelo somatório dos comprimentos das fraturas, total ou parcialmente inserida na célula, dividido pela unidade de área.

Uma técnica com indicações para tratamento matemático de juntas é proposta por Tsoutrelis et al. (1990). A técnica consiste em uma sequência otimizada de operações, no trabalho utilizada para análise de fotografias de afloramentos, porém passível de utilização para outros sensores.

A primeira etapa é a vetorização dos lineamentos observados. Com os dados em formato vetorial, são analisadas características geométricas dos traçados, como orientação dos lineamentos, comprimento dos traços, espaçamento dos lineamentos e rugosidade dos traçados.

Após o cálculo destes parâmetros geométricos, para diversos afloramentos tratados, os autores procuram a distribuição estatística à qual os dados ajustam-se, para desta forma comparar os dados obtidos em cada afloramento analisado.

Um novo método para análise de lineamentos, buscando diminuir tendências de amostragem, foi proposto por Rohrbacht Jr. et al. (2002). Baseia-se em áreas de busca circulares. O método é ilustrado na figura 4.3, e as equações para obtenção dos parâmetros são mostradas a seguir.

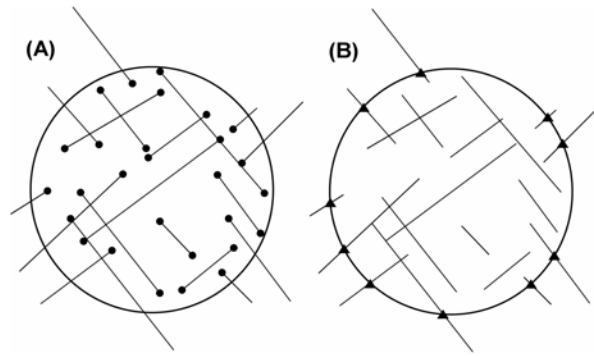


Figura 4.3 – Círculo de amostragem. (A) Os círculos pretos (m) representam pontos de terminação de lineamentos dentro do círculo de amostragem. (B) Os triângulos pretos são pontos de interseção (c) entre o círculo de amostragem e os lineamentos. Modificado de Rohrbaugh Jr. et al. (2002).

A densidade de lineamentos (ρ) é calculada a partir de terminações internas ao círculo de busca, como mostrado na seguinte equação:

$$\rho = m / 2\pi r^2.$$

Equação 4.7 – Densidade de lineamentos.

Para o cálculo do comprimento médio dos lineamentos (μ) dentro da área amostrada usa-se:

$$\mu = (\pi r / 2)(n / m).$$

Equação 4.8 – Comprimento médio de lineamentos.

Para estimar a intensidade (I) dos lineamentos na área amostrada, os autores propõem:

$$I = n / 4r.$$

Equação 4.9 – Intensidade de lineamentos.

Comparações entre os métodos tradicionais de análise e resultados obtidos a partir deste método de amostragem podem ser encontradas em Rohrbaugh Jr. et al. (2002). Alguns métodos de quantificação para modelos empíricos são apresentados em Landim (1997). No trabalho, este autor, discute a representação de dados vetoriais no plano, de maneira sucinta, e apresenta algumas possibilidades de tratamentos em espaços tridimensionais.

4.1.4 Métodos de análise fractal

Análises de traçados de lineamentos utilizando técnicas fractais já vêm sendo discutidas pela comunidade de Ciências da Terra há alguns anos (MacLennan et al., 1991). A característica de invariabilidade com relação à escala (Mandelbrot, 1967), para padrões de fraturas em diversos de seus aspectos, segue uma relação logarítmica indicada por:

$$N(f) = f^{-Df}$$

Equação 4.10 – Relação exponencial fractal.

, onde $N(f)$ é algum atributo da fratura f (maior ou igual a 1), e Df a dimensão fractal deste atributo da fratura.

Técnicas baseadas na dimensão fractal de objetos que representam feições estruturais podem indicar anisotropias em um sistema de fraturas, auxiliar a comparação de diferentes modelos/padrões de fraturas ou na discriminação de diferentes sistemas, gerados em diferentes regimes tectônicos, entre outras aplicações (Hirata, 1989; Gillespie et al., 1993; Magnavita e Souza, 1995; Magnavita, 2000; Guarnieri, 2002; Volland e Kruhl, 2004).

Entre as técnicas empregadas, a mais utilizada é aquela baseada em contagens de caixas (*Box-Counting*). O método consiste em analisar os objetos de interesse através da superposição de uma grade com quadrados de lado s . Os quadrados que encontram-se sobrepostos a uma estrutura são então contados. O processo é repetido com a sobreposição de grades de diversos tamanhos de s . Então, o número $N(s)$ de caixas que sobrepõem lineamentos é plotado contra o tamanho do lado destas caixas em um gráfico log-log (Peitgen et al., 1992; Volland e Kruhl, 2004). Os pontos plotados exibem uma correlação linear caso o modelo investigado seja fractal. O coeficiente angular da reta ajustada a estes pontos representa a dimensão fractal do modelo analisado (Figura 4.4).

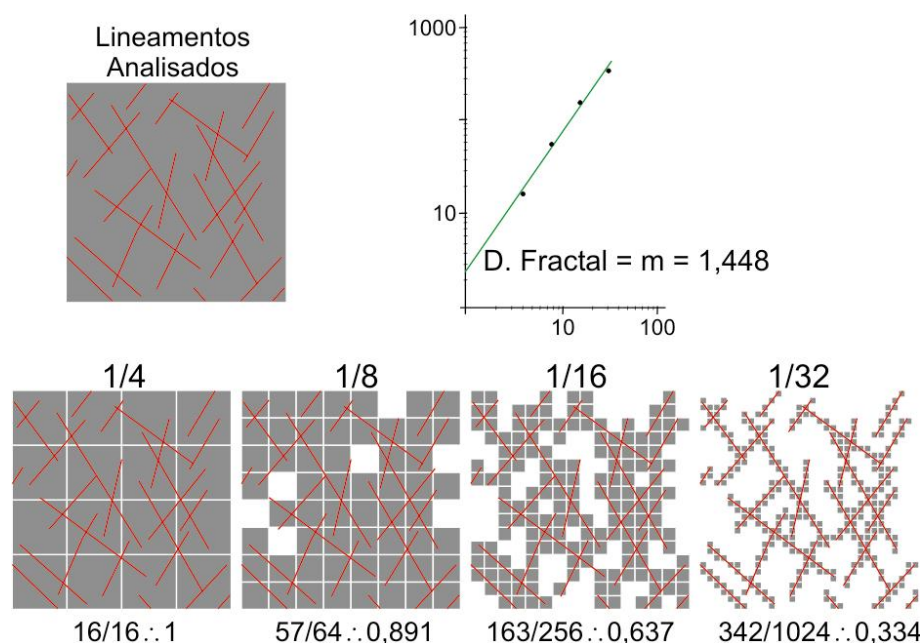


Figura 4.4 – Análise utilizando o método de contagem de caixas (*Box-Counting*). São mostradas quatro análises, com tamanhos de caixas indicados. No gráfico acima os resultados das contagens são plotados em um gráfico log-log. A dimensão fractal é obtida através do coeficiente angular m da reta ajustada.

Outro modelo clássico de análise fractal, para lineamentos, é através da distribuição da frequência do comprimento dos traços. Os comprimentos dos lineamentos analisados são agrupados em certo número de classes, então a frequência acumulada de cada classe é plotada, também em um diagrama log-log, contra o tamanho da classe. Da mesma forma que indicado no método de contagem de caixas, a dimensão fractal é obtida pelo coeficiente angular da reta ajustada aos pontos (Gillespie et al., 1993; Guarnieri, 2002; Volland e Kruhl, 2004).

Uma adaptação do método de distribuição das frequências é indicada por Volland e Kruhl (2004). Estes autores analisaram a distribuição de frequências em diversas direções. Através da

geração de linhas de busca, com determinado espaçamento, são analisadas as distribuições dos espaçamentos entre fraturas. Para cada direção é então calculada a dimensão fractal da distribuição destes espaçamentos. Os valores são então plotados em gráficos, conforme os azimutes das linhas de busca referentes às análises (Figura 4.5). Através do uso desta técnica podem ser detectadas anisotropias direcionais nos conjuntos de dados analisados.

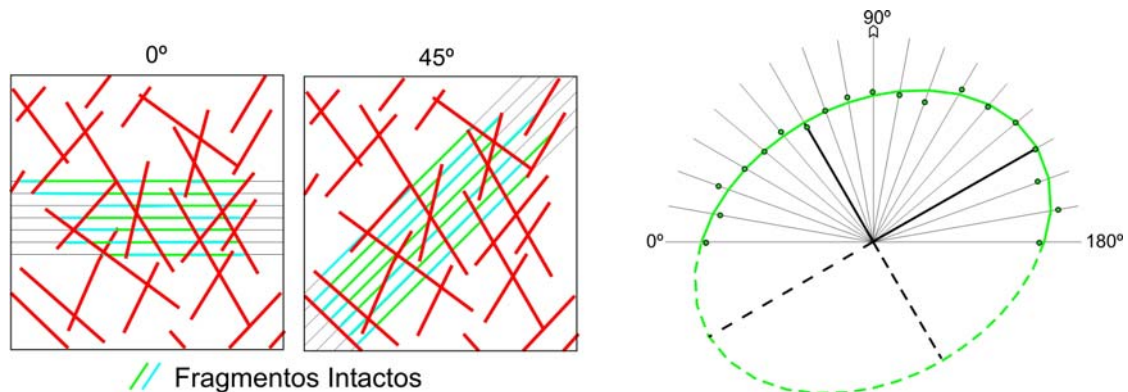


Figura 4.5 – Análise da dimensão fractal por linhas de busca. Os quadros à esquerda indicam dois contos de linhas de busca. O gráfico à direita demonstra uma elipse ajustada aos dados plotados conforme o azimuth das linhas de busca.

Padrões encontrados na natureza, entretanto, apresentam muitas vezes mais de um critério de distribuição exponencial. Desta forma há presença de mais de um expoente fractal, resultando em modelos multifractais (Agterberg et al., 1996; Magnavita, 2000).

4.1.5 Processamento Numérico

A partir dos conceitos revisados, foi elaborado um programa computacional, denominado LinAnalyst, para auxílio na análise de lineamentos obtidos por sensores remotos. O programa consiste basicamente em análises computadas por métodos de contagem a partir das coordenadas x e y dos extremos de vetores, utilizando conceitos básicos de geometria plana e estatística. O programa foi confeccionado em linguagem *Basic* orientada a objetos, e compilado para o sistema operacional WindowsTM.

O programa tem três módulos principais. O módulo inicial, e interface principal do programa, onde são executadas análises a partir de algumas das formulações apresentadas neste capítulo. Outro módulo é referente a análises estatísticas básicas dos lineamentos. O terceiro módulo é voltado à visualização dos lineamentos e execução de mapas de rosetas.

A análise dos dados é executada sempre a partir do par de coordenadas x e y dos dois extremos de um vetor em uma tabela formato *dBase* (arquivo .dbf). Para conversão dos dados (que normalmente encontram-se em formato vetorial), ao formato indicado, foram criados dois programas auxiliares. Um deles é um *script* elaborados em VBA (*Visual Basic for Applications*)

dentro do programa ArcMAP e o outro um programa independente (*standalone*) construído em *Basic* orientado a objetos.

Devido ao processamento relativamente lento, o programa foi limitado para análises de banco de dados contendo até 50000 lineamentos.

Script em VBA para obtenção das coordenadas dos extremos dos lineamentos:

Com a possibilidade de programação de *scripts* dentro do pacote ArcMAP, foram elaboradas duas rotinas. A primeira delas quebra polilinhas em segmentos individuais (figura 4.6) e a segunda insere os campos X_1 , Y_1 e X_2 , Y_2 , referentes aos extremos do lineamento, na tabela *.dbf*, associada ao *shapefile* (arquivo *.shp*).

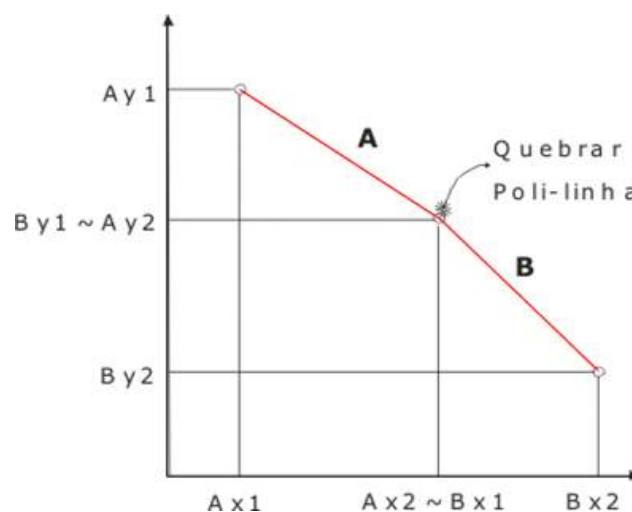


Figura 4.6 – Segmentação de lineamentos em vetores individuais.

Na primeira rotina indicada fez-se uso do comando *split* em cada vértice de uma polilinha. Para sua utilização deve-se inserir um *shapefile* novo logo abaixo daquele que vai ser quebrado em segmentos individuais (código fonte no anexo 3). A segunda rotina é responsável pela inserção das coordenadas na tabela referente ao *shapefile* (ver anexo 3).

Obtenção das coordenadas com programa independente em BASIC orientado a objetos

O programa criado faz a leitura de arquivos vetoriais *.dxf* (AutoCAD) ou *.shp* (ESRI – ArcMAP) e gera um arquivo de texto ASCII com as coordenadas x e y dos extremos de cada vetor. Para confecção deste programa foi utilizada a biblioteca MapOBJECTS da ESRI. O programa, chamado de Vector2XYCoords (Figura 4.7), também apresenta como opção de processamento quebrar as polilinhas em seus vértices. A partir do arquivo de saída, em formato ASCII, pode-se então gerar uma tabela *dBase* posteriormente lida pelo programa LinAnalyst.

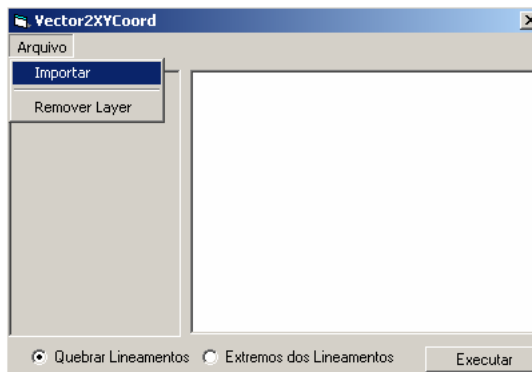


Figura 4.7 – Aspecto do programa Vector2XYCoord.

4.1.6 O Programa computacional *LinAnalyst**

A interface principal (Figura 4.8) é composta de três partes fundamentais: o *frame* “Seleção do Banco de Dados”, o *frame* “Processos de Análise” e de uma porção expansível da janela, relativa aos processos de filtragens direcionais e de comprimento. A conexão aos dados é feita com a indicação dos parâmetros de coordenadas x e y dos extremos dos lineamentos.

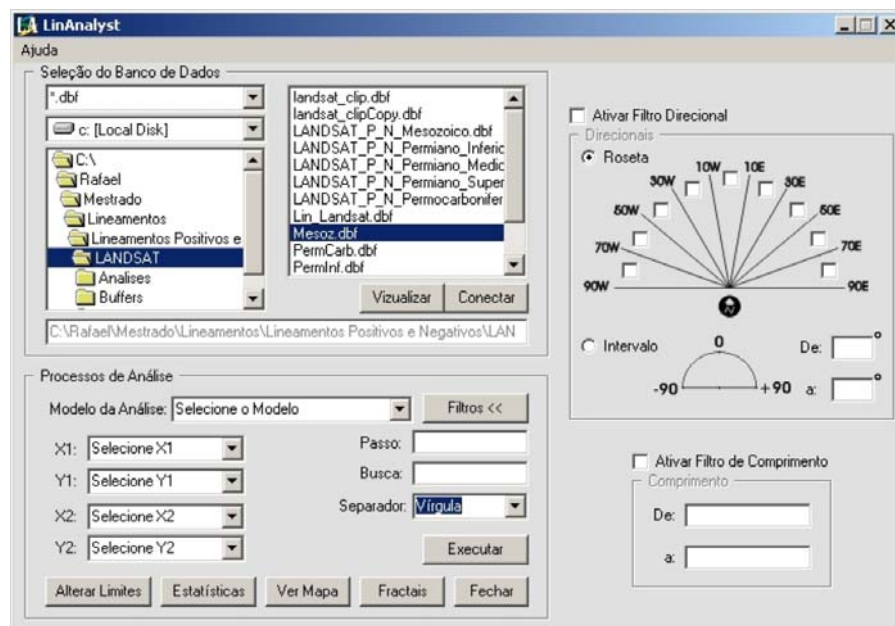


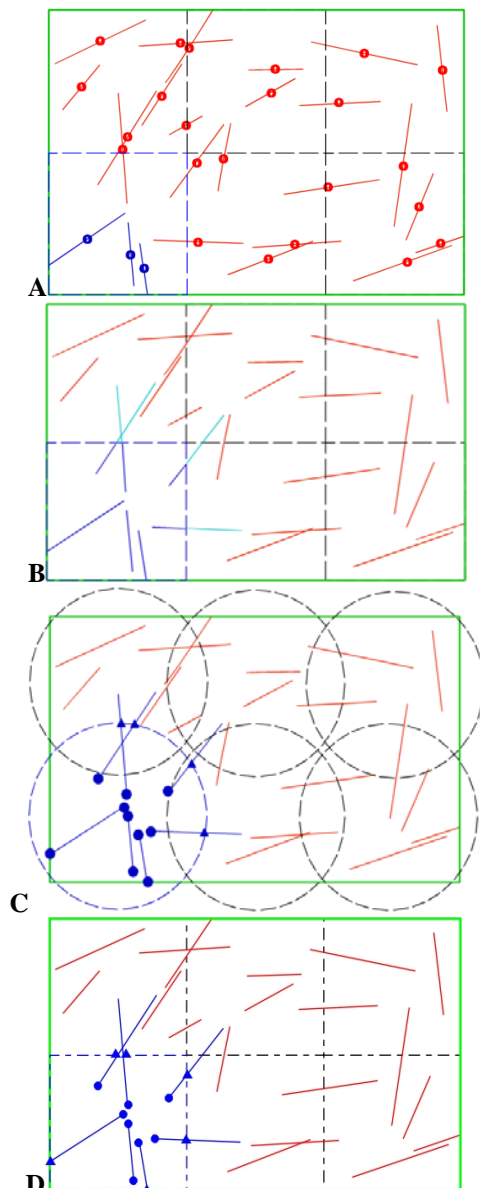
Figura 4.8 – Interface principal do programa LinAnalyst.

O *frame* “Processos de Análise” é composto pelas caixas de seleção do modelo de análise, indicação dos campos referentes a X1, X2, Y1 e Y2, botão de ativação do painel dos filtros e dos campos passo e busca da análise e seleção do separador para arquivo de saída (vírgula, espaço ou tabulação).

Os modelos analíticos disponíveis foram denominados “centróides”, “linhas de busca” (circulares e por grades), “grade” e “interseções”. Nos quatro métodos o processo de análise segue o mesmo princípio. A área é segmentada em diversas células e processamento é então executado para

* Um fluxograma operacional encontra-se no Anexo 4. O aplicativo, bem como seu manual, encontram-se no CD (Anexo 3).

cada uma delas. A figura 4.9 indica o procedimento de análise para os métodos de contagem. A segmentação é definida pelo passo, indicado pelo usuário. A busca para os métodos “centróides”, “grade”, “linhas de busca em grade” e “interseções” é referente ao passo indicado, visto que os resultados serão células com lado igual ao passo (ver anexo 4). Para o método de análise “Linhas de Busca Circulares” também é necessária a indicação do raio de busca pelo usuário, referente ao círculo utilizado no processamento. O arquivo de saída é em formato ASCII, contendo as coordenadas centrais de cada célula analisada (x e y) e os atributos calculados. Para o método “centróides” são calculados os atributos frequência e comprimento total acumulado. Para o método “grade” são computados frequência, comprimento total e parcial acumulados. Para os métodos de linhas de busca são computados os parâmetros densidade, intensidade e comprimento médio. As interseções são indicadas em frequência acumulada. Todos os algoritmos utilizados são derivados de geometria analítica plana.



A- No método dos centróides, para cada célula analisada são identificados os centróides presentes. A partir destes são computados frequência e comprimento acumulado destes lineamentos. Pode-se observar para a célula indicada em azul a presença de 3 centróides, portanto a frequência para esta célula é 3 e o comprimento acumulado é referente à soma do comprimento total destes mesmos três lineamentos.

B- No método indicado (grade), a contagem é executada a partir da presença do lineamento. Independente da parte inserida na célula analisada a presença acrescenta uma unidade à frequência de lineamentos. Além da frequência, neste método também são computados comprimento parcial e total dos lineamentos que interceptam a célula.

C- Neste método, conhecido como linhas de busca circulares (Rohrbaugh Jr. et al., 2002), além do espaçamento da grade, o usuário indica o raio da linha de busca. O programa então detecta interseções dos lineamentos com o círculo de busca (parâmetro n , indicado por triângulos) e terminações dos lineamentos que estejam inseridos no círculo de busca (parâmetro m , indicado por círculos). A partir destes dois valores são então calculados, através das equações anteriormente indicadas, intensidade, comprimento e densidade de lineamentos.

D- Variação do método anterior. Os pontos de interseção e internos são computados a partir de uma grade regular quadrada. Com estes valores são então calculados os atributos intensidade, comprimento e densidade de lineamentos. As fórmulas para cálculo dos atributos foram adaptadas com relação à área das células de busca.

Figura 4.9 – Alguns métodos de análise utilizados no programa LinAnalyst.

Além do arquivo XY-atributos de saída, pode-se salvar também um arquivo com indicação dos parâmetros utilizados na análise. Neste arquivo com informações sobre o processamento, também em formato ASCII, são indicados o nome e local de armazenamento do arquivo de entrada, o nome e local do arquivo de saída (arquivo processado .xya), o modelo de análise utilizado, o passo de busca, o separador do arquivo de saída e os tipos de filtrações, caso utilizados.

As análises podem ser refinadas através de processos de filtração angular e direcional dos lineamentos, associadas ou não. Para as filtrações direcionais pode-se selecionar o filtro roseta, onde os azimutes estão divididos em classes de 20° ou através de um intervalo indicado pelo usuário. Os lineamentos que corresponderem às classes ou intervalos indicados serão considerados e aqueles que não satisfizerem as condições indicadas serão excluídos. Para a filtração por comprimento, o usuário indica um intervalo (comprimentos mínimo e máximo) e os lineamentos que não estiverem dentro deste intervalo serão excluídos. Ainda no *frame* dos processos de análise, pode-se selecionar os limites que serão utilizados através do botão “Alterar Limites”. Caso os limites não sejam alterados, o programa detecta automaticamente os extremos norte, sul, leste e oeste e utiliza-os como limites de busca.

O módulo de estatísticas é ativado no *frame* “Processos de Análise” da interface principal. Em sua primeira janela são indicados o número de lineamentos, extremos (norte, sul, leste e oeste), comprimentos do maior e do menor lineamentos, comprimento médio, frequência por área, comprimento por área, além da ocorrência de lineamentos em porcentagem nas classes azimutais (em intervalos de 10°). Estes itens podem ser salvos em um arquivo de texto ASCII. Nesta janela também é possível implementar procedimentos por diagramas de rosetas (frequência e comprimento) para os dados inseridos nos limites da análise. O usuário pode escolher o número de classes, bem como adicionar ou não aos diagramas alguns parâmetros estatísticos (ver anexo 4). Os resultados podem ser salvos em figuras *bitmap*.

No módulo de visualizações de lineamentos (Mapas), através do menu “Opções”, pode-se selecionar os itens “Opções de Mapa” e “Opções de Cor” (ver anexo 4). Na janela das opções de mapa, são relacionados 3 tipos principais de visualização com relação aos lineamentos. No primeiro *frame* (“Inserir Lineamentos”), pode-se optar por dois tipos de classificação: angular ou por comprimento. A classificação angular é executada desenhando cada classe de lineamentos (2, 4 ou 8 classes) em determinada cor. Ainda na janela “Opções de Mapa” pode-se também optar pela geração de mapas de rosetas (ver anexo 4). A área é dividida em células e para cada uma delas é então gerado um diagrama de rosetas através dos lineamentos que apresentam seu centróide dentro de cada célula. O diagrama pode ser de frequência, comprimento acumulado, ou ainda da relação frequência/comprimento acumulado. O usuário define o número de divisões que o mapa terá em seu eixo X (leste-oeste) e, a partir deste parâmetro é computado o lado das células. O usuário também

seleciona quantas pétalas terão os diagramas, se semi-circulares ou círculos completos, indicação ou não do número de amostras de cada célula, se as linhas com limites e ainda se os círculos externos aos diagramas serão inseridos. Outra opção é realizar uma análise relacionando todos os diagramas entre si. Neste caso as rosetas de todas as células serão proporcionais umas às outras. Pode-se, também, optar pela visualização de dados processados através da interface principal. Para tanto deve-se indicar o parâmetro que será visualizado. Através do último *frame* da janela “Opções de Mapa” é possível selecionar a inserção da borda (limite da análise), e de uma grade, com indicação dos intervalos nas coordenadas x e y .

Na janela “Opções de Cor” podem ser selecionadas as cores dos lineamentos, borda, grade e rosetas. Ainda nesta janela pode-se escolher a escala de cores que será utilizada na visualização das análises de contagem. Todos os mapas gerados podem ser salvos em formato *bitmap*.

O módulo de análises fractais apresenta, em sua janela principal, dois *frames* e uma tela para visualização dos dados (ver anexo 4). No *frame* superior indica-se a área que será relacionada e no inferior o método de análise e seus parâmetros. Os métodos analíticos implementados são o de contagem de caixas, direcional e através de classes de comprimentos.

No método de contagem de caixas o usuário pode selecionar entre três diferentes tipos de elementos de busca: presença, centróides e lineamento inteiro (Figura 4.10). O número de grades que serão utilizadas, bem como seus tamanhos (proporcional à área de análise indicada), podem ser definidos. Há três opções padrão, com 4, 6 e 8 grades de busca distintas e, ainda, pode-se selecionar outros parâmetros (até 12 tamanhos de grade). Após a execução das contagens, os resultados são plotados em um gráfico log-log, uma reta é ajustada pelo método dos mínimos quadrados e os parâmetros coeficiente angular (dimensão fractal) e coeficiente de correlação com os pontos são indicados (ver anexo 4).

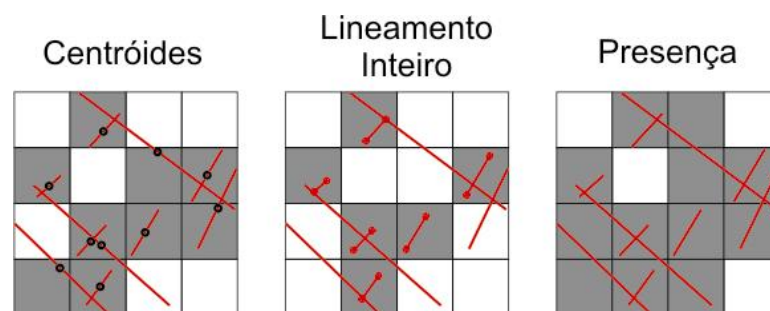


Figura 4.10 - Métodos de busca para análise por contagem de caixas.
As caixas escuras são aquelas que detectaram lineamentos.

No método de análise por classes de comprimento, o espectro de comprimento dos lineamentos é dividido em determinado número de intervalos. Este número é definido pelo usuário. Os parâmetros de análise para as classes de comprimento podem ser: frequência acumulada,

comprimento acumulado ou comprimento dividido pela frequência. Da mesma forma que no método de contagem de caixas, os dados são plotados em um diagrama log-log. No eixo X são indicados os valores centrais das classes e no eixo Y os valores do método analítico selecionado. Os parâmetros da reta ajustada, como citado no método anterior, são também indicados no gráfico.

O método de análise fractal por linhas de busca em diferentes ângulos (Volland e Kruhl, 2004) é aquele indicado na figura 4.5. São geradas linhas de busca, com separação indicada pelo usuário, de 10° em 10°. Os resultados são referentes à média de comprimentos intactos, dimensão fractal por classes de comprimento e dimensão fractal por frequência acumulada. Para cada um dos três resultados é gerado um gráfico como aquele da figura 4.5. Para o ajuste da elipse aos dados uma rotina em MatlabTM (ver anexo 3) é indicada (Fitzgibbon, 1999).

4.2 APLICATIVO PARA DETERMINAÇÃO DE PALEOTENSÕES PELO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB

A análise de paleotensões, a partir do emprego do método de Mohr-Coulomb, apresenta resultados bastante satisfatórios na discriminação de diferentes eventos tectônicos para áreas sedimentares submetidas a deformações em regime rúptil (Riccomini, 1995; Strugale, 2002; Trzaskos-Lipski et al., 2002). Através da indicação dos tensores em diagramas, pode-se obter uma visualização generalizada do comportamento de estruturas agrupadas, e desta forma inferir diferentes campos de tensão. A partir destas premissas foi desenvolvido um aplicativo de simples utilização, chamado Sigmas, visando calcular e visualizar os tensores a partir do método indicado.

4.2.1 Critério de determinação de tensões

O critério de análise de falhas, com o modelo de Mohr-Coulomb, refere-se à indicação de uma componente de deformação triaxial (tensões máxima - σ_1 , intermediária - σ_2 e mínima - σ_3), relacionada ao plano de falha (Price e Cosgrove, 1990). Os eixos σ_1 e σ_3 estão inseridos em um plano auxiliar, que contém o vetor referente ao movimento (*estria*) e também o vetor normal ao plano de falha (*pólo do plano de falha*). O eixo σ_1 apresenta um ângulo α , com relação ao vetor movimento, entre 20° e 40° em fraturas rúpteis (normalmente 30°) para corpos isotrópicos (Ragan, 1985). O eixo σ_3 posiciona-se a um ângulo β , complementar de α , a partir do mesmo referencial de origem, porém rotacionado em sentido oposto. Já o eixo σ_2 encontra-se contido no plano de falha e posiciona-se de maneira perpendicular ao vetor movimento (Figura 4.11).

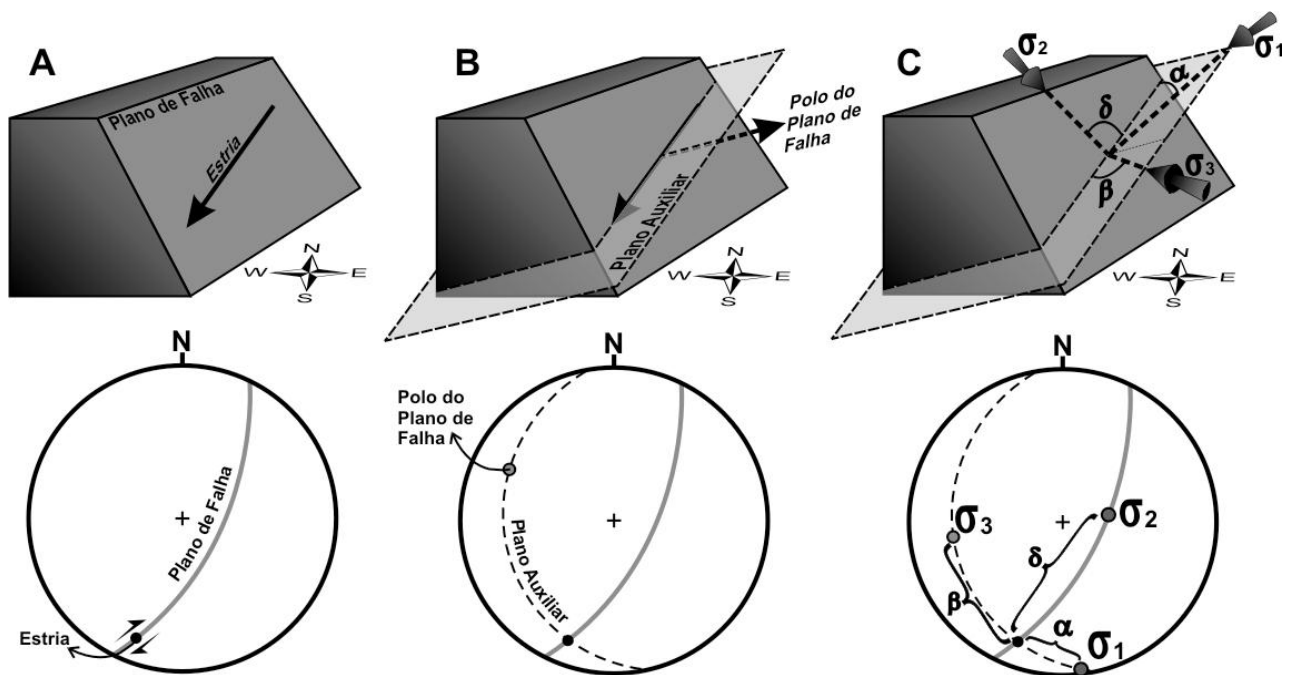


Figura 4.11 – Obtenção das tensões pelo critério de Mohr-Coulomb.

A - Bloco diagrama e visualização ciclográfica do plano de falha e estria indicando o movimento;
B - Plano auxiliar que contém σ_1 e σ_3 ; C - Indicação dos tensores e relação angular com a estria.

4.2.2 Desenvolvimento matemático

A partir dos dados de entrada em coordenadas polares (notação Clar – Azimute ϕ e Mergulho θ), constituídos pelo plano de falha (pf) e pela estria (vetor es) com indicação cinemática, demonstra-se como são obtidos os tensores σ_1 , σ_2 , e σ_3 (de Freitas et al., 2005).

Com pf em coordenadas polares, calcula-se o pólo deste plano (vetor ppf). O mergulho de ppf é referente ao módulo do ângulo θ de pf subtraído de 90° . O azimute de ppf é referente ao ângulo ϕ de pf acrescido de 180° , caso $\phi < 180^\circ$. Caso contrário subtrai-se este valor de ϕ .

Em seguida as coordenadas polares de pf , es e ppf são convertidas em coordenadas retangulares x , y e z . A transformação é obtida a com as seguintes equações:

$$x = \sin \theta \cdot \cos \phi; \quad y = \sin \theta \cdot \sin \phi; \quad z = \cos \theta$$

Equações 4.11 (Coxeter, 1969)

Utilizando a expressão matricial do produto vetorial em coordenadas retangulares:

$$r = u \times v = \begin{vmatrix} x & y & z \\ u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}$$

Equação 4.12 (Arfken, 1985)

onde u e v representam os vetores es e ppf , obtém-se o vetor resultante r (ortogonal auxiliar - $aux1$). Este vetor, referente ao pólo do plano auxiliar, será o eixo de rotação para calcular os vetores σ_1 e σ_3 . As equações obtidas a partir da aplicação da matriz aos vetores são:

$$x_{aux1} = y_{es} \cdot z_{ppf} - z_{es} \cdot y_{ppf}; \quad y_{aux1} = z_{es} \cdot x_{ppf} - x_{es} \cdot z_{ppf}; \quad z_{aux1} = x_{es} \cdot y_{ppf} - y_{es} \cdot x_{ppf}.$$

Equações 4.13.

Este procedimento também é executado entre os vetores es e $aux1$. Assim, um segundo vetor auxiliar ($aux2$) é criado. Ele será o complemento do sistema de coordenadas utilizado na rotação do vetor es em torno do vetor $aux1$. Aplicando a matriz de rotação:

$$R_z(\alpha) = \begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Equação 4.14 (Arfken, 1985)

em torno do eixo z ($aux1$) ao vetor x (es), obtemos os vetores rotacionados σ_1 e σ_3 ($\alpha = \pm 30^\circ$ para σ_1 e $\alpha = \pm 60^\circ$ para σ_3). Este procedimento também é aplicado ao vetor es com eixo de rotação em ppf , obtendo então σ_2 ($\alpha = 90^\circ$). As equações obtidas para σ_1 e σ_3 são:

$$\begin{aligned} x_{\sigma1 \text{ e } \sigma3} &= (x_{es} \cdot x_\alpha) + (x_{aux2} \cdot y_\alpha) + (x_{aux} \cdot z_\alpha); \\ y_{\sigma1 \text{ e } \sigma3} &= (y_{es} \cdot x_\alpha) + (y_{aux2} \cdot y_\alpha) + (y_{aux} \cdot z_\alpha); \\ z_{\sigma1 \text{ e } \sigma3} &= (z_{es} \cdot x_\alpha) + (z_{aux2} \cdot y_\alpha) + (z_{aux} \cdot z_\alpha). \end{aligned}$$

Equações 4.15.

, observando que x_α , y_α e z_α podem ser $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$ para σ_1 e σ_3 , respectivamente. Para σ_2 deve-se substituir $aux2$ por aux e aux por ppf nas equações acima. Utiliza-se x_α , y_α e z_α referentes a rotação de 90° . Para critério de posicionamento de σ_1 e σ_3 , em sentido horário ou anti-horário, a partir de es , considera-se a indicação cinemática da estria. Os dados de σ_1 , σ_2 e σ_3 são então convertidos de coordenadas retangulares para polares a partir das equações:

$$\phi = \text{atan}(y/x); \quad \theta = \text{atan}((x^2 + y^2)^{1/2} / z).$$

Equações 4.16 (Coxeter, 1969).

4.2.3 O aplicativo *Sigmatas**

Desenvolvido com *Basic* orientado a objetos em ambiente visual, apresenta dois painéis principais (Figura 4.12). O primeiro é relativo à entrada de dados. Estes podem ser inseridos individualmente ou através de arquivos em formato ASCII. Os dados de entrada são o plano de

* O aplicativo e seu manual encontram-se no CD (Anexo 3).

falha e estria, com respectiva indicação cinemática (padrão Clar). Após a inserção destes dados, podem ser computados os tensores. Os resultados podem ser salvos em arquivos ASCII.

O segundo painel permite a visualização dos dados. Além dos tensores calculados, podem ser observados os planos de falha, com a respectiva indicação cinemática e estria. Os resultados podem ser salvos através de uma figura *bitmap* (ver figura 4.12).

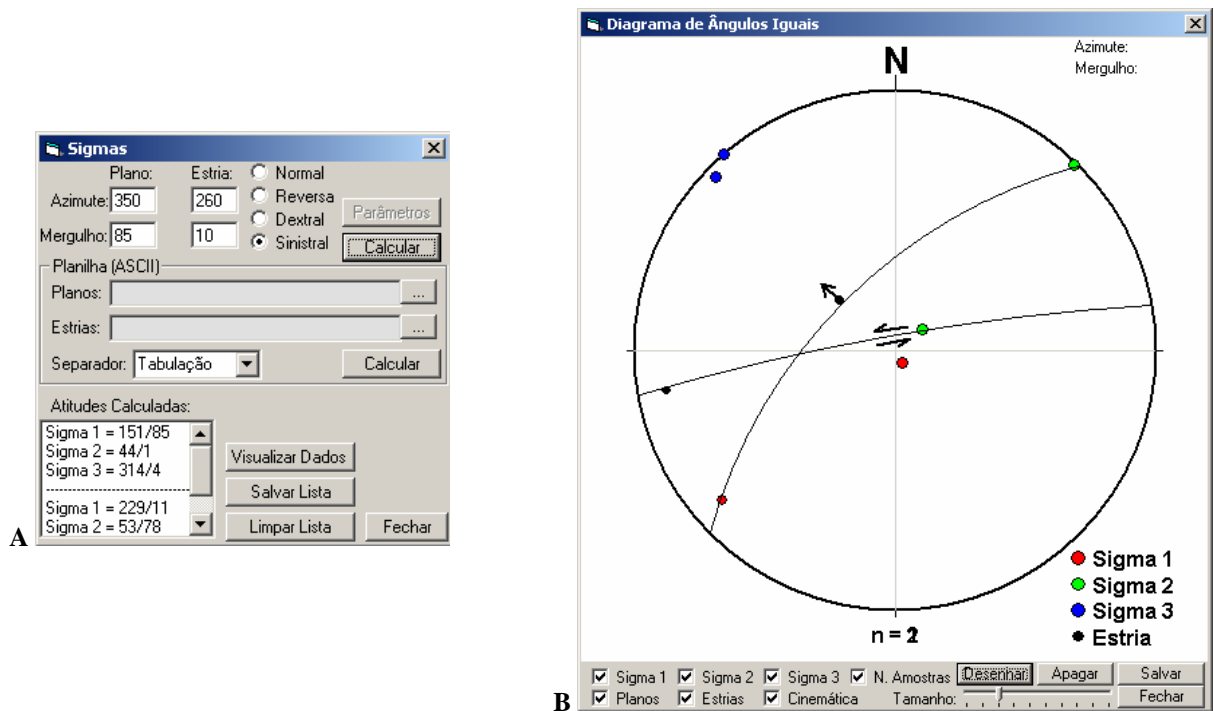


Figura 4.12 – Aspecto do aplicativo Sigmas. A - Entrada de dados; B - Visualização dos dados.

5 ANÁLISE DOS DADOS

As análises aqui indicadas foram divididas em quatro itens distintos. No primeiro item são tratados os dados dos sensores superficiais (Landsat7 e SRTM) através de diversas técnicas implementadas no *software* LinAnalyst (ver item 1 do capítulo 4). Posteriormente são discutidos e interpretados os dados obtidos com os sensores geofísicos. O terceiro item refere-se à apreciação dos dados levantados em campo. A integração destas análises é executada no quarto item, onde se discutem também as diferentes ordens de grandeza envolvidas.

5.1 ANÁLISE DOS LINEAMENTOS OBTIDOS A PARTIR DOS SENSORES DE SUPERFÍCIE

5.1.1 Análise direcional regional

Em um primeiro momento, os dados interpretados foram segmentados em diferentes intervalos litoestratigráficos, a saber: A) intervalo Mesozóico, com lineamentos obtidos sobre rochas extrusivas da Formação Serra Geral e soleiras correlatas, além de rochas das formações Botucatu e Pirambóia e B) intervalo caracterizado como Permocarbonífero, este com lineamentos obtidos sobre rochas das formações Rio do Rasto, Teresina, Serra Alta, Irati, Palermo, Rio Bonito e do Grupo Itararé. Este segundo pacote foi subdividido conforme a coluna estratigráfica do Mapa Geológico do Paraná (MINEROPAR e DNPM, 1989), em porções chamadas de Permiano Superior (formações Rio do Rasto, Teresina e Serra Alta), Permiano Médio (Formações Rio Bonito, Irati e Palermo) e Permiano Inferior-Carbonífero (Grupo Itararé).

Os dados, depois de segmentados, foram analisados através de diagramas de rosetas para visualização de seu comportamento nos diferentes intervalos (figuras 5.1 e 5.2). Algumas características podem ser observadas nas relações entre os dados. Devido à característica já indicada no capítulo 3, relacionada à passividade do sensor Landsat7 (Queiroz et al., 2000; Williams, 2004), os diagramas apresentam uma quantidade muito maior de estruturas no quadrante NW. Desta forma, as análises direcionais para este sensor foram elaboradas de maneira proporcional ao conjunto completo dos dados.

Nota-se uma maior incidência para os lineamentos de direção aproximadamente E-W no intervalo mesozóico nos dados SRTM90, enquanto o permocarbonífero apresenta moda nos lineamentos com direção aproximadamente N-S, tanto para frequência como para comprimento acumulado.

Nos dados obtidos com o sensor Landsat7 também é clara a maior quantidade de lineamentos com direção N-S para o intervalo permocarbonífero. A diminuição na incidência de lineamentos de direção aproximada E-W do intervalo mesozóico para a porção permocarbonífera, no entanto, não é tão clara para este sensor. De maneira geral, porém, os dois sensores mostram que há uma variação perceptível no comportamento dos dados interpretados nas duas diferentes regiões.

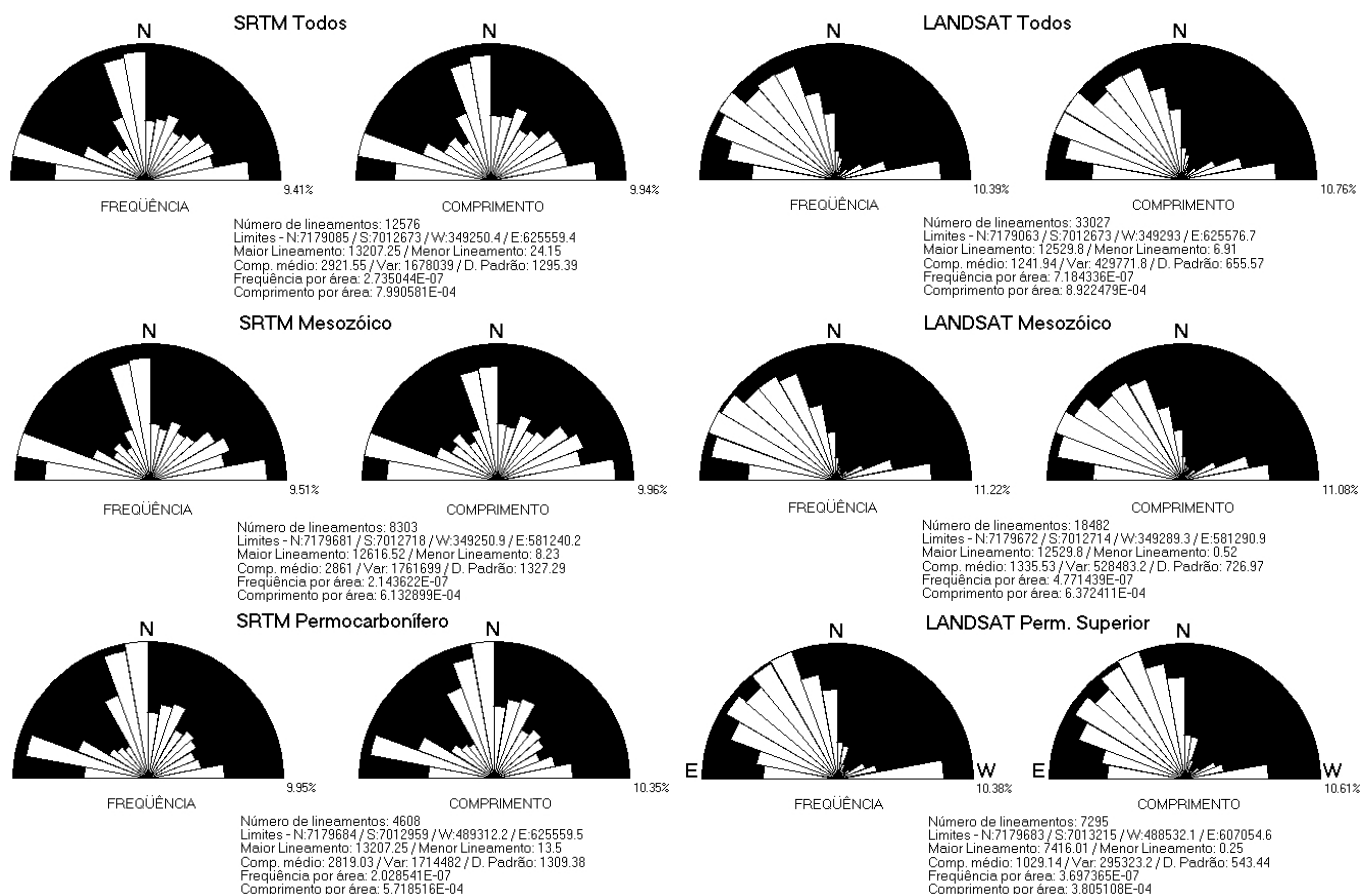


Figura 5.1 – Diagramas de rosetas da área estudada e para os diferentes pacotes cronológicos (SRTM90 e Landsat7). As pétalas representam classes de 10°.

Os lineamentos inseridos no quadrante NE dos diagramas, obtidos com o SRTM-90, mostram uma maior concentração em NNE, ou seja, com maior tendência ao norte para o intervalo permocarbonífero, enquanto o pacote mesozóico apresenta uma concentração maior de lineamentos ENE. Este aspecto, quando se comparam os valores das classes direcionais individualmente, também é corroborado através dos dados obtidos com o sensor Landsat7, apesar da análise visual ser dificultada no diagrama de rosetas devido à menor presença de lineamentos para este sensor.

Outra peculiaridade é o comprimento médio dos lineamentos apresentar-se maior na porção mesozóica da região estudada para ambos os sensores. Este aspecto pode estar relacionado à menor quantidade de eventos posteriores à formação das estruturas nestas rochas mais jovens. Desta forma, as estruturas impressas nos primeiros eventos após os derrames basálticos estariam menos segmentados por eventos posteriores.

Dentro do intervalo permocarbonífero, para os dois sensores, foi possível também observar algumas particularidades (ver figuras 5.1 e 5.2). Dentro deste intervalo, nota-se uma concentração majorada de lineamentos com direção N-S dentro da subdivisão permiano superior. Para os lineamentos com direção principal E-W a área de maior concentração é o intervalo permiano médio, também para os dois sensores.

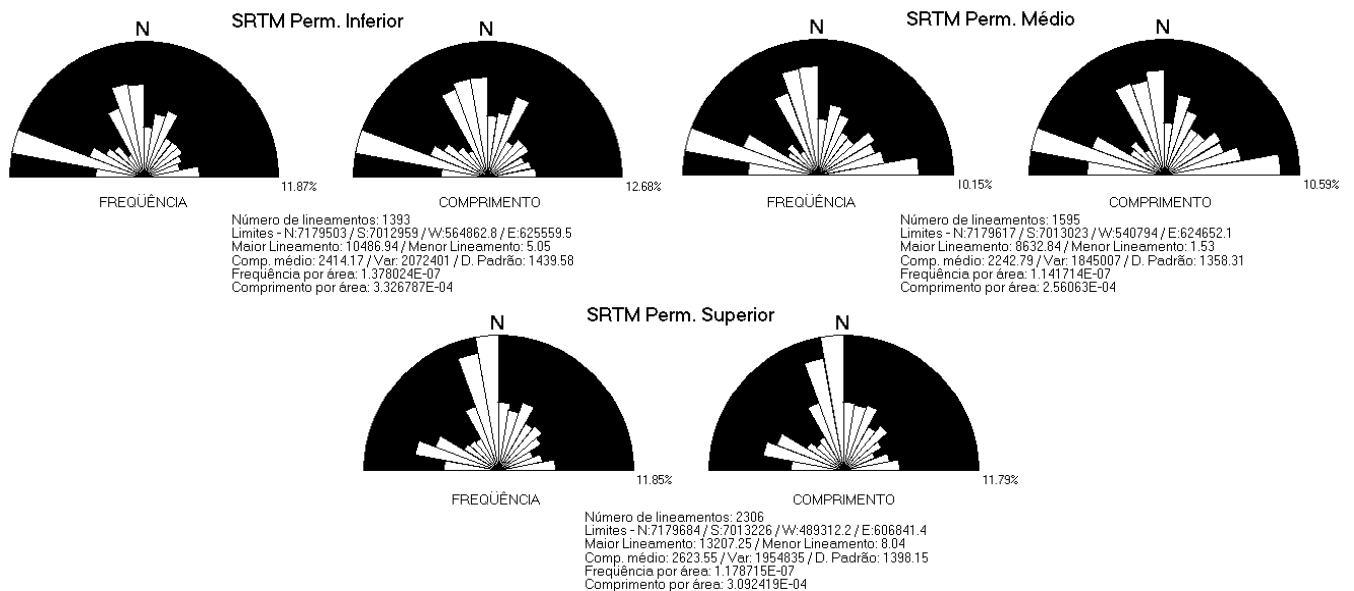


Figura 5.2 – Diagramas de rosetas da área estudada e para os diferentes pacotes cronológicos (SRTM90). As pétalas representam classes de 10°.

Para o SRTM90 observa-se uma grande concentração de lineamentos de direção ENE para as três subdivisões, com maior intensidade, entretanto, para os intervalos permiano médio e inferior.

Outra análise direcional executada com estes lineamentos foi através da segmentação da área estudada em células regulares, com inserção em cada uma destas células de um diagrama de rosetas. O procedimento é executado automaticamente através do programa LinAnalyst, em seu módulo mapa. A região foi dividida, na extensão leste-oeste, em 10 compartimentos e, na extensão norte-sul, em 6 compartimentos, perfazendo um total de 60 células de mesmo tamanho. Para a análise foram usados os lineamentos extraídos tanto das imagens Landsat7 como do MDE SRTM90. Os mapas de rosetas foram elaborados tanto para comprimento acumulado como para frequência acumulada. Os mapas encontram-se nas figuras 5.3 e 5.4.

O aspecto, anteriormente citado, referente a uma notável maior quantidade de estruturas com direção N-S nos intervalos permocarboníferos pode ser facilmente observada através dos mapas de rosetas. Nota-se, ainda, que nas células inseridas, ou parcialmente inseridas, nas unidades do Permiano Superior (ver figuras 5.3 e 5.4), esta tendência N-S é ainda mais acentuada, principalmente nos dados obtidos a partir do MDE SRTM90.

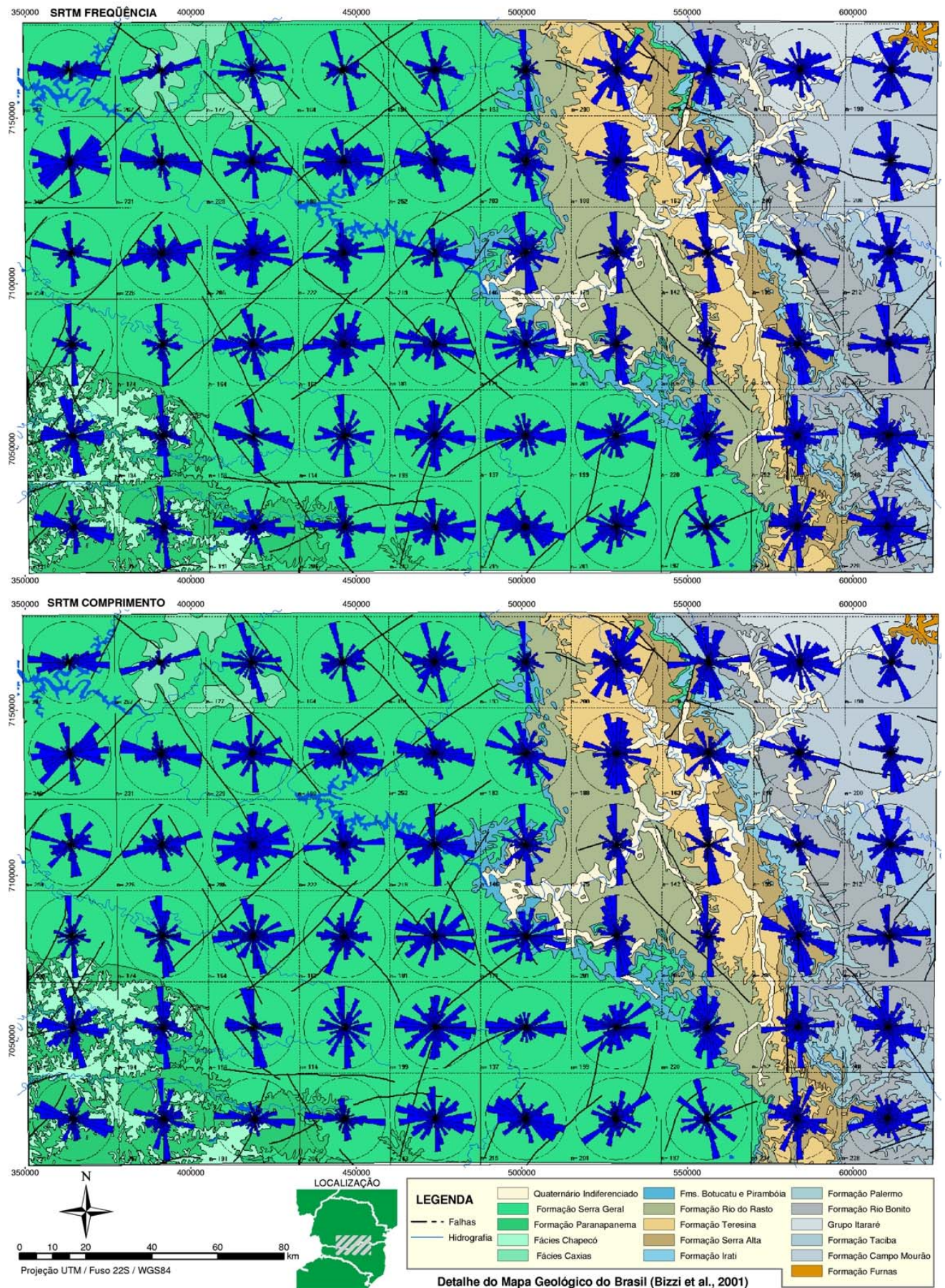


Figura 5.3 – Mapas das rosetas de frequência e comprimento acumulados para os lineamentos obtidos com o MDE SRTM90. As pétalas das rosetas estão em classes de 10°.

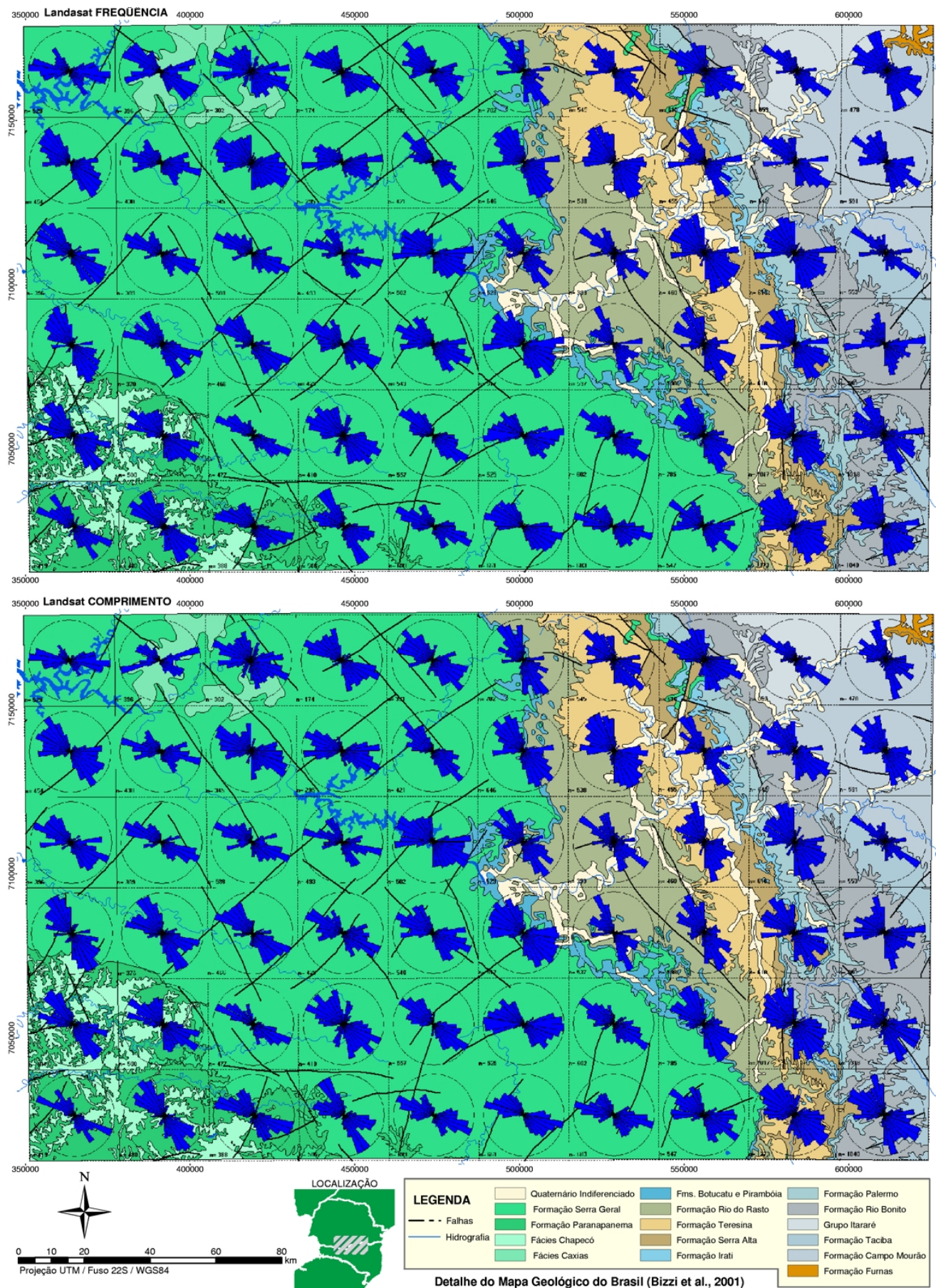


Figura 5.4 – Mapas das rosetas de frequência e comprimento acumulados para os lineamentos obtidos com imagens Landsat7. As pétalas das rosetas estão em classes de 10°.

Quando comparados às falhas indicadas no mapa geológico, sobposto, os diagramas nem sempre tem um aumento significativo nas direções destas falhas. Tal aspecto, diretamente ligado às escalas de observação das estruturas, pode ser indicativo de diferentes componentes ao longo de uma falha ou zona de falha. Além dos diferentes padrões, referentes aos distintos intervalos (relação principalmente observada quando se relacionam as células analisadas na direção E-W), nota-se uma variação quando se comparam individualmente os diagramas em direção N-S. Por exemplo, no extremo oeste da área, nota-se a presença significativa de lineamentos N-S e WNW para o SRTM90, bem como de lineamentos NW para o sensor LANDSAT. Entretanto, nas células mais ao norte, ainda no extremo oeste, observa-se claramente uma anomalia E-W para os dois sensores.

Através das indicações direcionais, e abstraindo-se a questão da maior quantidade de estruturas NW interpretadas para o sensor Landsat7, notam-se respostas diferentes para os dois conjuntos de lineamentos. Diferentes resoluções dos dois sensores, e conseqüentes distintas escalas de análise, podem estar demonstrando conjuntos de estruturas interpretadas que representam ordens de grandeza diversas. Este fator de variabilidade nas respostas, em diferentes escalas de trabalho, é apresentado na literatura clássica (Tchalenko, 1970; Wilcox et al., 1973) e também em estudos recentes envolvendo análises de geometria por dimensão fractal (Hippertt, 1999).

Um exemplo bastante claro, relacionado à escala de observação, pode ser indicado através do alinhamento de feições associadas a fraturas escalonadas (*stepovers*). Estas apresentam direções divergentes da estrutura maior à qual estão associadas (Figura 5.5). Desta forma, em um sensor de menor resolução, apenas a estrutura transcorrente maior é perceptível. Já com uma escala menor de observação (maior resolução), as estruturas escalonadas são perceptíveis.

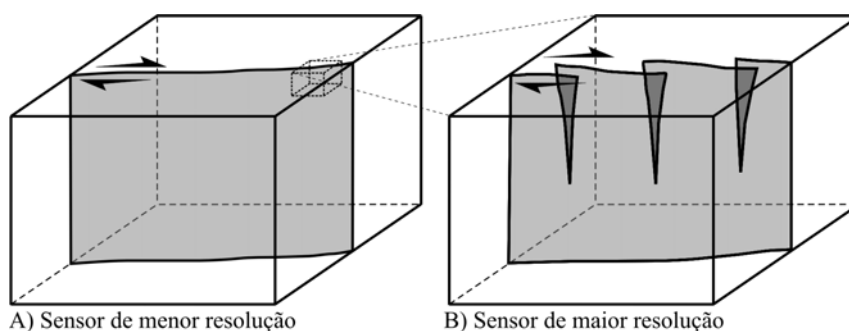


Figura 5.5 – Detalhamento de estruturas em diferentes escalas de observação.
Modificado de Aydin e Nur (1985).

Em regiões submetidas a eventos tectônicos recorrentes e de diversas naturezas, caso da Bacia do Paraná, elementos de diferentes estruturas podem estar superimpostos. Desta forma a identificação de estruturas maiores a partir de elementos menores pode ser enganosa. Assim, um sensor de menor resolução (caso do SRTM90 em relação às imagens Landsat7) torna-se bastante

útil na identificação de estruturas de maior magnitude. A partir destas estruturas maiores, então, o detalhamento pode ser executado de forma mais criteriosa utilizando sensores de resolução maior.

5.1.2 Análise de lineamentos com auxílio de *buffers*

Para compreensão do comportamento estrutural em superfície das grandes zonas de falha definidas por Zalán et al. (1987), bem como regiões onde os lineamentos interpretados em superfície apresentaram grande continuidade, foram executadas análises através de *buffers*. Para os estudos foram utilizados *buffers* de 5 e 10 km (Figuras 5.6 e 5.7), devido à manutenção das características estatísticas dos parâmetros de relevo (declividade, aspecto e hipsometria) para os lineamentos ao se utilizar estes espaçamentos.

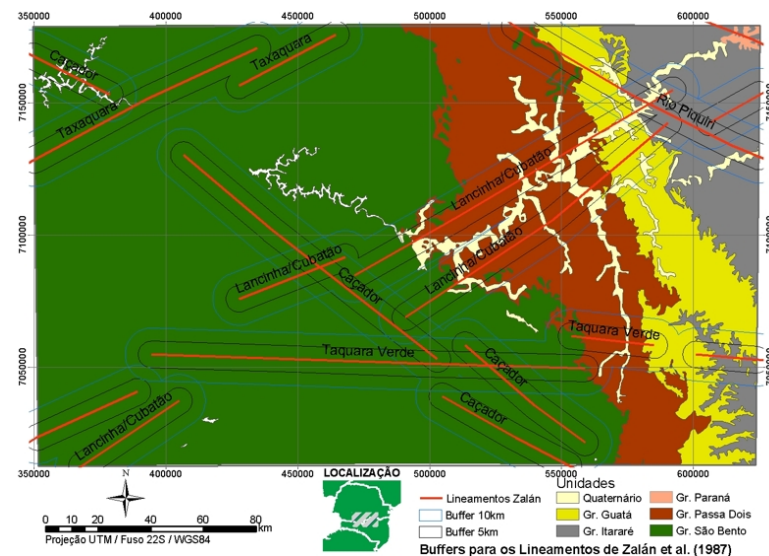


Figura 5.6 – Área de análise dos *buffers* para os lineamentos de Zalán et al. (1987).

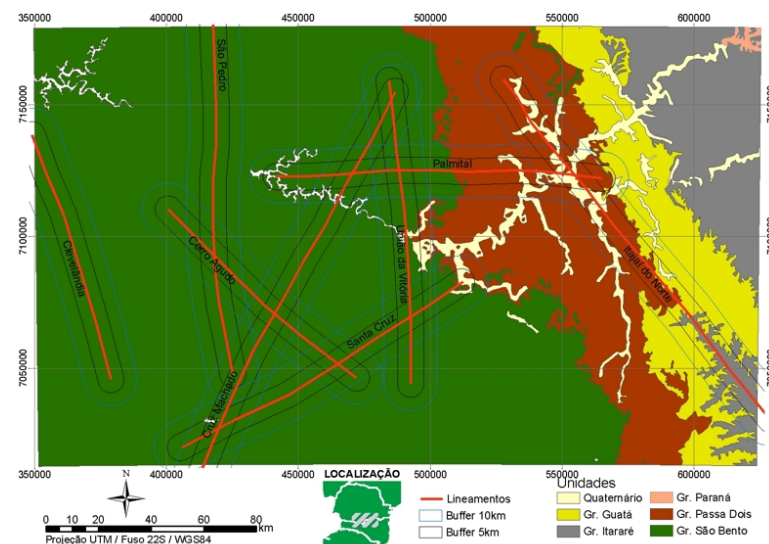


Figura 5.7 – Área de análise dos *buffers* para os grandes lineamentos interpretados.

Os lineamentos interpretados a partir do modelo SRTM90 e das imagens Landsat7 foram segmentados a partir dos *buffers* indicados (ver figura 5.6). Com os dados foram então elaborados diagramas de rosetas para cada um dos lineamentos de Zalán et al. (1987), a fim de observar o

comportamento direcional destas zonas em superfície. Os diagramas das figuras 5.8 e 5.9 indicam o comportamento dos lineamentos para cada uma das áreas de influência.

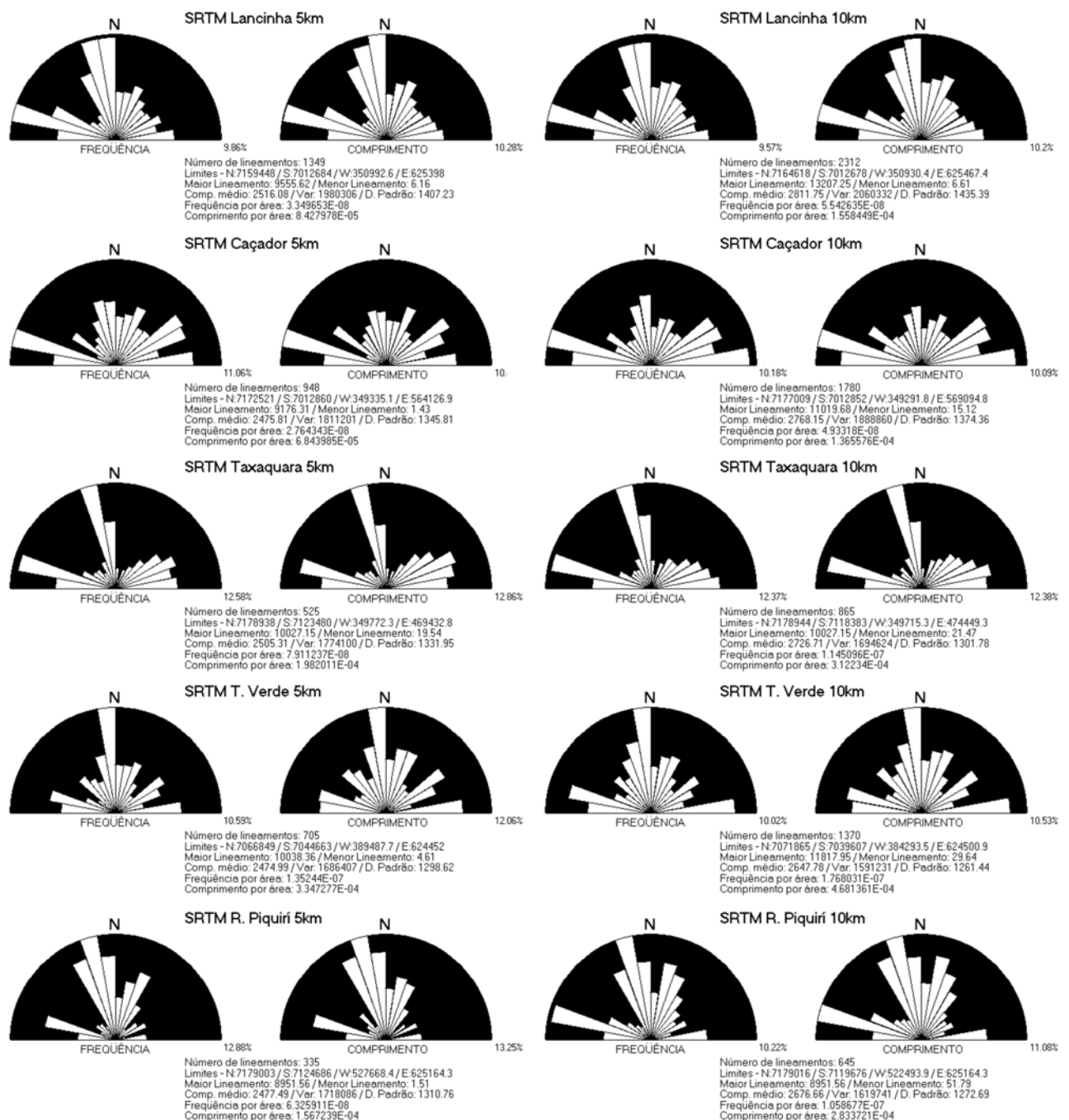


Figura 5.8 – Diagramas de rosetas para os lineamentos SRTM90 inseridos nos buffers dos lineamentos de Zalán et al. (1987).

Para a ZF da Lancinha, observa-se através dos diagramas, para os lineamentos obtidos com o MDE SRTM, duas concentrações principais, uma de direção N0-30W e outra N70-80W, enquanto a direção NW aparece como a direção de menores valores. A distribuição no quadrante NE para estes lineamentos apresenta-se bastante uniforme. Para o sensor Landsat7 a maior concentração é NW, porém, comparativamente aos outros buffers se vê também uma tendência N-S, fato também

observado na rede de drenagens. Os diagramas para esta ZF apresentam características bastante semelhantes às observadas para os dados em toda a área de estudo (ver figura 5.1).

Para os diagramas referentes à ZF de Caçador as maiores concentrações aparecem, para o MDE SRTM90, nas direções E-W e ENE, sendo, notadamente, a ZF com menores concentrações N-S para a área de estudo. Para os lineamentos interpretados a partir das imagens Landsat observa-se uma concentração maior em WNW e outra em E-W.

Para o Lineamento de Taxaquara observa-se, através dos lineamentos obtidos com o SRTM90, três concentrações principais, duas maiores em NNW e WNW e outra menor entre E-W e ENE. Os diagramas confeccionados para os lineamentos extraídos do sensor Landsat mostram para esta ZF uma tendência NW generalizada.



Figura 5.9 – Diagramas de rosetas para os lineamentos Landsat inseridos nos buffers dos lineamentos de Zalán et al. (1987).

O Lineamento de Taquara Verde, através dos dados obtidos do MDE SRTM90 (lineamentos e drenagens) mostram forte tendência N-S. Nos diagramas dos lineamentos traçados a partir das imagens LANDSAT7 observa-se baixa incidência da direção E-W.

Finalmente, para o Lineamento do Rio Piquiri, observa-se através dos diagramas variações notáveis nos dados obtidos para os buffers de 5 km e 10 km. Desta forma, observando apenas os diagramas para o buffer de 5 km, nota-se uma tendência WNW para os lineamentos obtidos com SRTM90 e rede de drenagens. Para os lineamentos interpretados com o sensor Landsat7, nota-se também uma maior concentração N-S e NNW relativa à média da área.

Com a segmentação dos lineamentos traçados a partir dos *buffers* de 5 e 10 km indicados na figura 5.7, foi possível também elaborar diagramas de rosetas para aqueles inseridos nas áreas de análise referentes às oito zonas de notável alinhamento.

As oito zonas de lineamentos interpretadas foram denominadas: Cerro Agudo, Clevelândia, Cruz Machado, Itajaí do Norte, Palmital, Santa Cruz, São Pedro e União da Vitória. Suas localizações podem ser observadas na figura 5.7 e a análise de seus comportamentos é discutida a seguir. A área de estudo do lineamento de Palmital foi segmentada em região mesozóica e permocarbonífera, devido ao comportamento bastante diferenciado deste lineamento para os dois pacotes. O comportamento direcional dos lineamentos estudados para estas regiões pode ser observado nos diagramas das figuras 5.10a e 5.10b. Algumas observações referentes a estes diagramas são feitas a seguir.

O Lineamento de Cerro Agudo tem concentrações notáveis de estruturas de direção ENE e N-S. Nota-se no diagrama para os lineamentos obtidos com o MDE SRTM maiores concentrações no quadrante NE.

Para o Lineamento de Clevelândia observam-se duas modas notáveis, uma com direção N-S e outra WNW. Há ainda uma distribuição menor, porém homogênea, em quase todo o setor NE para os lineamentos obtidos com o SRTM90.

Nos diagramas dos lineamentos referentes aos *buffers* de Cruz Machado, notam-se duas modas principais nas direções NWN e WNW. Uma terceira concentração de direção NE também pode ser observada.

Para o Lineamento de Itajaí o padrão é praticamente o mesmo acima descrito, com pequeno aumento relativo à concentração nos lineamentos de direção N-S.

Os digramas para o Lineamento de Santa Cruz têm concentração alta em E-W e N-S, com concentrações secundárias em NE. Para este lineamento nota-se relativa mudança nos dados obtidos com os *buffers* de 5 e 10 km, principalmente quanto ao comprimento acumulado.



Figura 5.10a – Diagramas de rosetas para os lineamentos SRTM90 inseridos nos buffers dos grandes lineamentos interpretados.

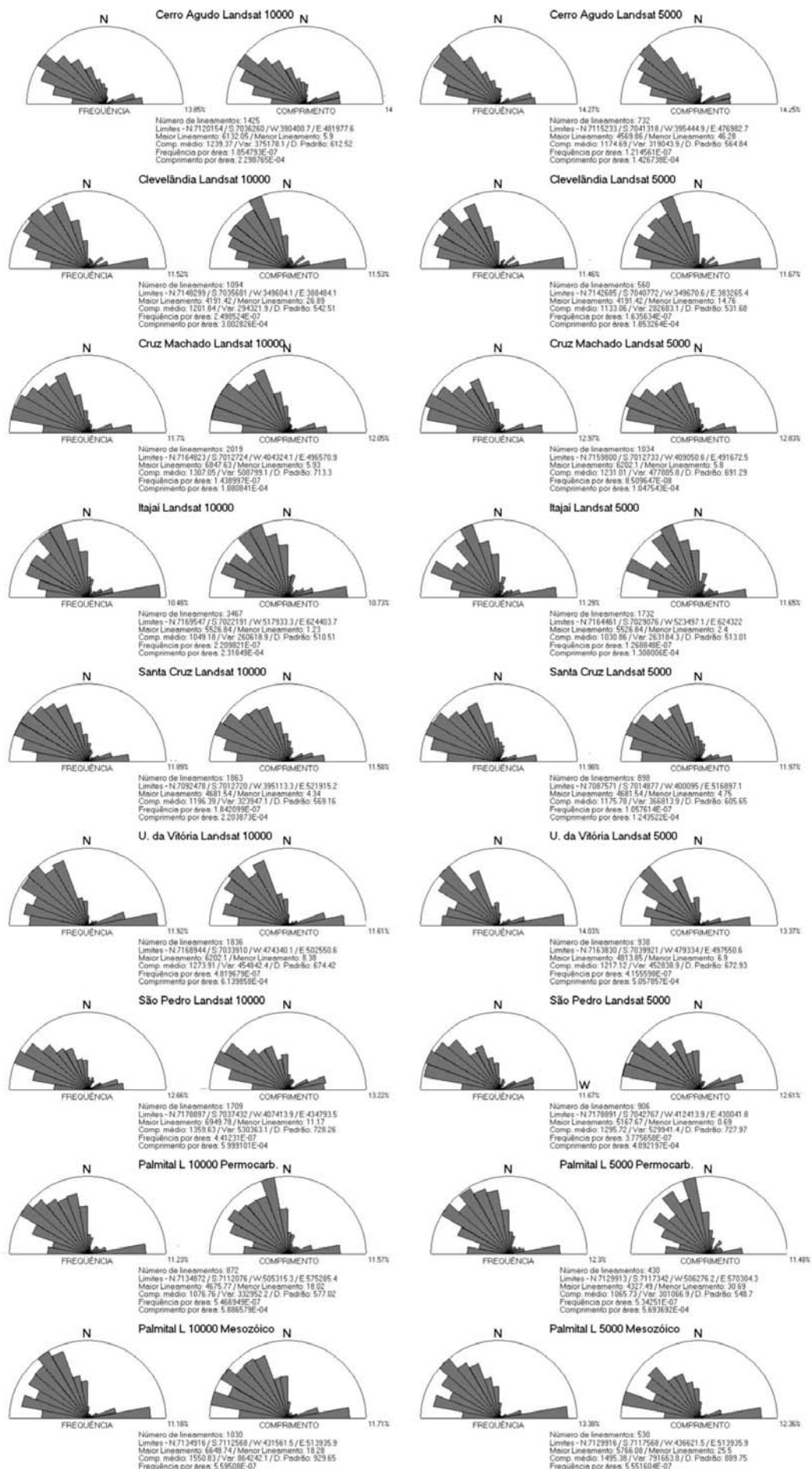


Figura 5.10b – Diagramas de rosetas para os lineamentos Landsat inseridos nos buffers dos grandes lineamentos interpretados.

O Lineamento de Palmital apresentou diferenças notáveis entre seus segmentos Permocarbonífero e Mesozóico. Nota-se uma concentração muito maior de lineamentos de direção aproximada N-S no pacote permocarbonífero que naquele referente ao Mesozóico. Neste último ocorre uma maior incidência de direção E-W.

A zona referente ao Lineamento de São Pedro também apresenta uma variação referente aos *buffers* de 5 e 10 km. As direções, entretanto, mais notáveis são referentes aos lineamentos N-S e WNW, com o quadrante NE tendo, como um todo, maiores concentrações.

O Lineamento de União da Vitória, por fim, apresenta como direção de maiores concentrações a E-W, com modas também nas direções NE e N-S.

Pôde-se de maneira geral observar que o comportamento dos grandes lineamentos, quando analisados através de estruturas individuais, apresentam características direcionais diferentes. Estruturas regionais com determinada direção, localmente apresentam comportamentos direcionais distintos. A direção Y, associada à direção principal das zonas de falha (conforme modelo de Riedel – Woodcock e Schubert, 1994) apresenta menores freqüências de ocorrência que fraturas R e R' por exemplo. Estas características apresentam grande influência nos aspectos de migração, convergência e acumulações de fluídos. Grandes estruturas, que podem, em escalas regionais, estarem associadas a longas rotas de migração, localmente podem conter estilos estruturais que sirvam como barreira para fluídos. Estas características de migração, convergência e retenção são discutidas mais criteriosamente na seqüência do texto.

A constante presença de lineamentos nas direções N-S e E-W também é um aspecto conspícuo à maioria das análises elaboradas na área estudada. Tais feições apresentam notadamente um padrão bastante marcante no relevo da área. Altas freqüências observadas para lineamentos de pequeno comprimento, em comparação a lineamentos mais longos, podem indicar uma relação a diferentes tipos de fraturas. Enquanto os lineamentos mais curtos estariam respondendo, por exemplo, como fraturas do Tipo I (abertura), aqueles de maiores comprimentos, normalmente de direções NW e NE, poderiam ser relacionados a fraturas do Tipo II (cisalhamento) e Tipo III (tesoura).

Fica também clara a tendência de estruturas de direção NW para as interpretações a partir do sensor Landsat7. Desta forma análises direcionais executadas a partir de estruturas interpretadas com o MDE SRTM90 são menos tendenciosas, apresentando, apesar da menor resolução, maior confiabilidade nos resultados.

5.1.3 Análise de atributos dos lineamentos

Todos os mapas utilizados foram elaborados com células de busca com dimensão de 5 quilômetros de lado e os mapas de contorno (Anexo 5) foram gerados usando interpolação pelo

método do vizinho mais próximo. Os métodos de contagem são aqueles indicados no desenvolvimento do programa computacional LinAnalyst (ver item 4.1.3 deste trabalho).

A ZF Lancinha/Cubatão, quando comparada aos mapas obtidos pelas contagens de lineamentos, aparece como uma região de baixos valores para frequência, comprimentos acumulados total e parcial, densidade e intensidade. Já no mapa de comprimento médio, obtido pelo método LBC, aparece quase em toda sua extensão associada a altos valores. Tais parâmetros indicam que seu reflexo em superfície traduz-se em uma zona com baixa densidade de lineamentos, porém tendo estes um comprimento médio maior que aqueles de sua vizinhança. Estas prerrogativas são válidas tanto para os dados obtidos a partir do SRTM-90 e LANDSAT7. Para as contagens executadas com os segmentos de drenagem, esta ZF apresenta-se, com exceção do mapa de intensidade obtido pelo método LBC, como uma região de altos valores.

O Lineamento de Taxaquara apresenta características semelhantes, porém o contraste dos valores com as regiões adjacentes não é tão alto, e não se nota continuidade tão acentuada de valores como para a ZF Lancinha/Cubatão.

A ZF de Caçador apresenta características de valores moderados a altos para todos os parâmetros analisados em quase toda sua extensão na área estudada. Esta característica abrange os dois sensores utilizados. Na região sul da área, onde o traçado desta estrutura é segmentado em dois lineamentos, há uma menor nitidez nas respostas obtidas, e talvez por influência da ZF Lancinha/Cubatão, a estrutura apresente alguns baixos valores. Para os segmentos de drenagem analisados esta estrutura não apresenta uma resposta muito clara. Para as contagens de frequência nota-se uma tendência a baixos valores. A intensidade apresenta a melhor resposta para a rede de drenagens, indicando uma região de altos valores.

O Lineamento do Rio Piquiri apresenta características semelhantes à ZF de Caçador, estando associada a altos valores de frequência, comprimentos totais e parciais, densidade e intensidade, para ambos os sensores. O parâmetro de comprimento médio (LBC) não apresenta uma resposta clara em toda sua extensão, talvez por influência da ZF Lancinha/Cubatão. As respostas dadas pela análise na rede de drenagens também não apresentam um padrão muito nítido.

Quanto ao Lineamento de Taquara Verde, de maneira geral, apresenta-se como uma região de valores baixos a moderados quando comparada com as áreas adjacentes. Para os modelos de contagens centróides e grade, nos lineamentos obtidos pelos dois sensores, ambos exibem um bom delineamento. Nos parâmetros obtidos pelo método LBC, entretanto, não se notou uma coerência tão grande em toda sua extensão. Apesar de ser uma estrutura bem mapeada (baixos valores) pelos parâmetros densidade e intensidade, torna-se uma região de altos valores quando intercepta o Vale do Rio Itajaí do Norte. Nas contagens executadas com a rede de drenagens não apresenta características bem definidas.

Em linhas gerais, nota-se uma associação entre as estruturas NW regionais e altos valores de frequência, comprimentos parciais e totais, densidade e intensidade, enquanto as estruturas de direção NE apresentam em superfície uma resposta de baixos valores para estes parâmetros, porém com comprimento médio de lineamentos maior que aqueles das regiões adjacentes. As redes de drenagem mostram, neste estudo, ser uma ferramenta com respostas mais claras para as estruturas de direção NE, sendo necessário, entretanto, uma análise mais detalhada para que sua utilização seja mais precisa. Não se descarta a possibilidade de geração de tendências NE durante a obtenção automatizada da rede de drenagens usada neste estudo (ver item 3.3).

Os parâmetros analíticos indicados e discutidos têm importância direta na interpretação de diversos aspectos relacionados à evolução de sistemas petrolíferos. Através dos métodos de contagem indicados podem ser tecidas algumas correlações:

Densidade: importante parâmetro analítico para observação da integridade da seção analisada. Pode estar relacionada tanto a características de aumento da taxa de recuperação de hidrocarbonetos, devido ao fraturamento da rocha reservatório, como também à integridade da seção selante.

Intensidade: tem importante papel na predição de convergência dos fluídos. A partir de análises em fraturas superficiais pode-se obter um indicador da expressão em sub-superfície destas estruturas.

Comprimentos: nas análises por comprimentos acumulados, observa-se íntima relação ao parâmetro intensidade. Através do comprimento ponderado, pode-se indicar qual o comportamento das fraturas com relação às suas maiores ou menores continuidades. Desta forma denotando grande importância e validade nas relações de migração.

Conectividade: este parâmetro é relativo tanto a aspectos para definição de rotas de migração como para critério de definição de anisotropias locais, também relacionadas ao potencial de integridade da seção selante.

A figura 5.11 indica alguns destes parâmetros, discutindo-os a partir de um modelo conceitual sintético (Rostirolla et al, 2003). No modelo observam-se falhas maiores, associadas ao embasamento, e falhas menores, restritas à bacia. As regiões de cruzamento de falhas de maior magnitude (regionais) são relacionadas a uma maior migração de fluídos. As falhas menores, localmente cimentadas, podem ter tanto caráter de convergência como de barreira para fluxos.

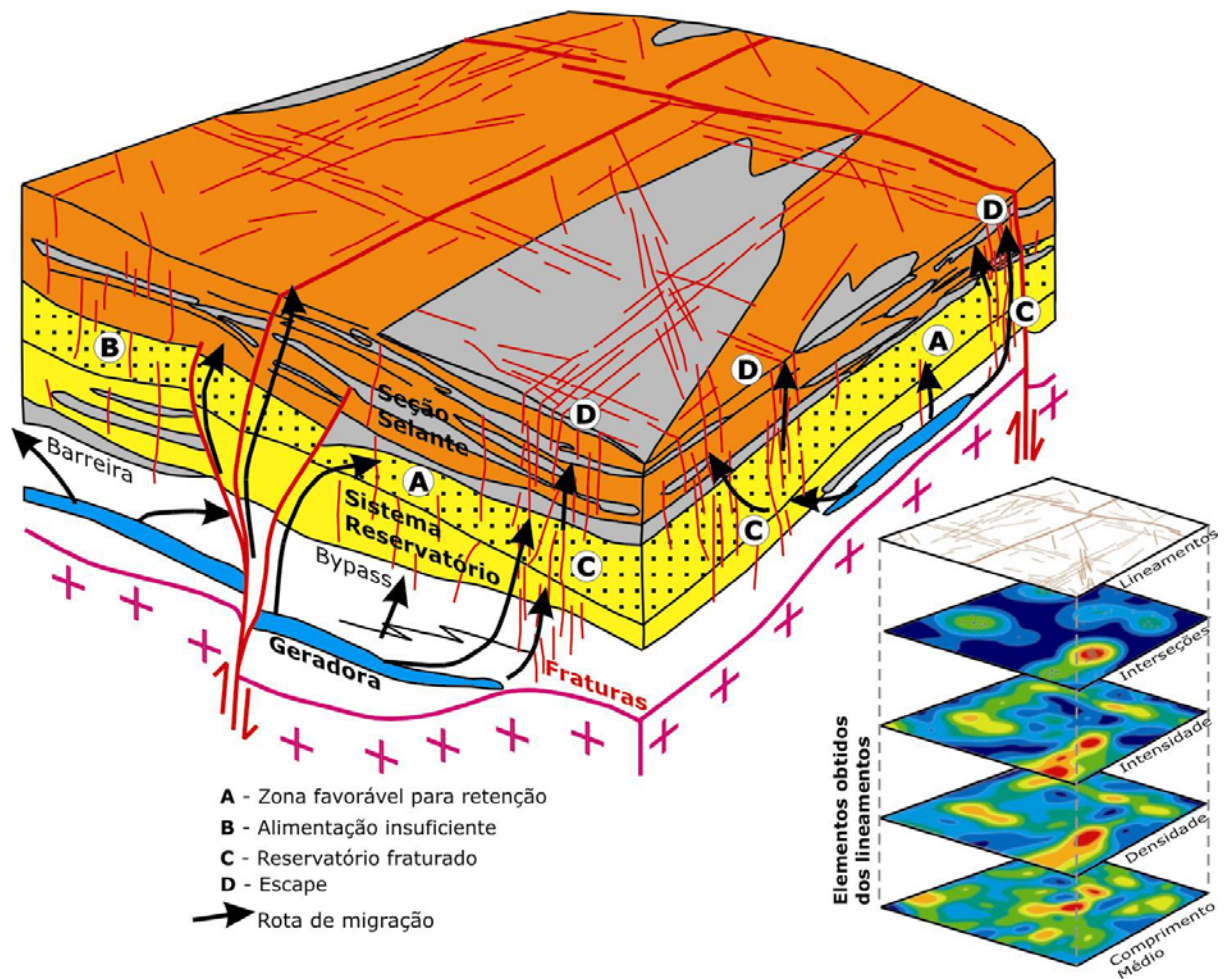


Figura 5.11 – Modelo conceitual sintético de migração e fraturas associadas.
 Adaptado de Rostirolla et al. (2003).

Nos mapas de contorno gerados para o modelo (ver figura 5.11), pode-se observar que o aspecto de interseção de lineamentos (conectividade) relaciona-se diretamente a altos índices de migração vertical. A migração lateral ocorre em locais de valores baixos a moderados de intensidade e densidade de estruturas. A integridade da seção selante reflete em baixos valores de densidade. Para maior convergência de fluídos observa-se uma relação direta entre valores moderados a altos de comprimento e intensidade de fraturas.

5.1.4 Análises utilizando dimensão fractal

Modelos regionais demonstram a possibilidade de acumulações de hidrocarbonetos em zonas de cruzamentos de grandes estruturas na bacia. As trapas estariam associadas a estruturas secundárias de maior complexidade, estas relacionadas a movimentos transcorrentes e distensionais (Rostirolla et al., 2003). A porção centro-sudoeste da área estudada satisfaz este critério, sendo ainda relacionada a um baixo gravimétrico, fator este também correlacionado a poços com indícios de hidrocarbonetos na bacia.

Uma análise fractal, pela técnica de contagem de caixas, foi realizada para a porção centro-sudoeste da área (Figura 5.12). A idéia foi comparar as respostas dadas pelos lineamentos obtidos com o MDE SRTM90 e com as imagens Landsat7. A área escolhida foi a região de cruzamento de estruturas regionais associadas a um baixo gravimétrico (ver anexo 2). Os procedimentos foram executados com o programa LinAnalyst, utilizando caixas em proporções de 1/10; 1/20; 1/40; 1/60; 1/80; 1/100 e 1/120 do lado da área da caixa original (limitada pelas coordenadas UTM 7090000 norte e 400000 oeste, com amplitude de 77000 metros), e a presença do lineamento como critério de busca.

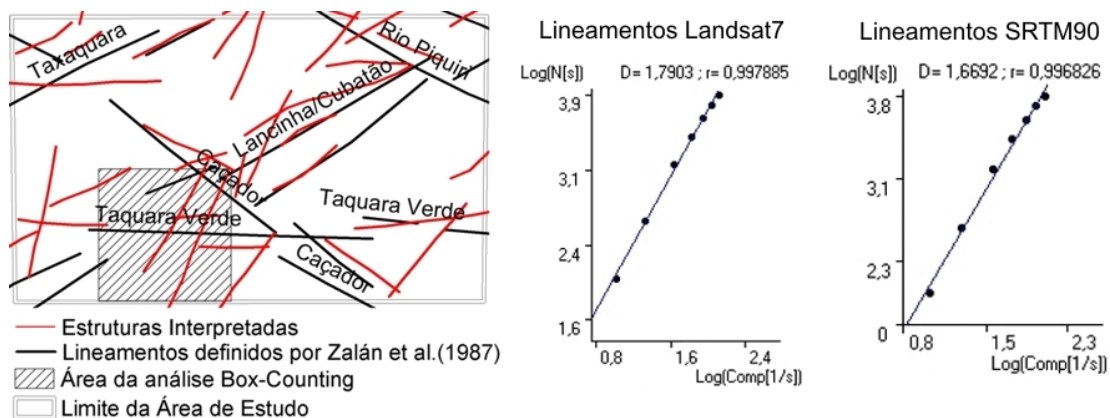


Figura 5.12 – Área de execução da análise *box-counting* e resultados plotados em diagramas log-log. Os diagramas mostram o número N de caixas com tamanho de lado s , contra $1/s$. D é dimensão fractal (coeficiente angular da reta ajustada por mínimos quadrados) e r o coeficiente de correlação.

As respostas dadas pelos dois conjuntos de dados indicaram diferentes dimensões fractais ($D_{\text{Landsat}} = 1,7903$ e $D_{\text{SRTM}} = 1,6692$), o que novamente sugere uma representação de estruturas de diferentes ordens de grandeza através das interpretações executadas para os dois diferentes sensores. Conjuntos de dados representando os mesmos eventos geológicos podem ter uma correlação na dimensão fractal aproximada até a segunda casa decimal (Volland e Kruhl, 2004) neste tipo de técnica.

Para a mesma área (indicada na figura 5.12) um exame através do método de frequência acumulada de classes de comprimento foi executada. A análise foi executada com 20 classes de comprimento e as retas ajustadas indicaram uma dimensão fractal de 1,7473 para os lineamentos obtidos do sensor Landsat e 1,616 para aqueles interpretados com o MDE SRTM90 (Figura 5.13). Apesar do baixo coeficiente de correlação, que pode estar indicando a necessidade de diversas retas ajustadas (multifractais), a diferença nas respostas segue a dispersão encontrada para as investigações executadas com a técnica de contagem de caixas (*Box-Counting*).

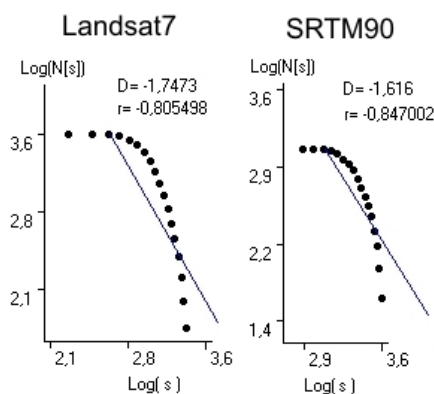


Figura 5.13 – Dimensão fractal por classes de comprimento. No digrama N (frequência acumulada de segmentos) está plotado contra s (valor médio de cada classe de comprimento). D é a dimensão fractal e r o coeficiente de correlação.

Uma análise multi-direcional para distribuição de frequências (ver figura 4.5) também foi executada para a mesma área indicada. Foram efetuados procedimentos para comprimento médio de blocos não fraturados e também para dimensão fractal obtida para a frequência acumulada de comprimentos (Figura 5.14).

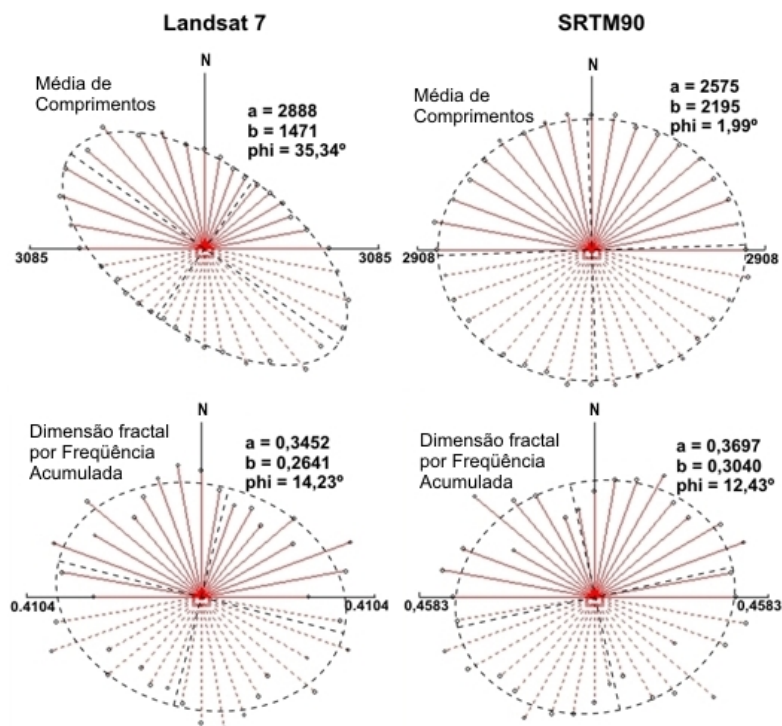


Figura 5.14 – Diagramas direcionais indicando comprimento médio das linhas de busca (gráficos superiores) e dimensão fractal para frequência acumulada (gráficos inferiores). Os pontos indicam o valor para cada classe direcional, plotados a partir do centro do diagrama, em seu respectivo azimuth. Os dados, para cada classe azimutal, foram ajustados a partir da divisão dos comprimentos em 20 classes de igual valor. Em preto tracejado as elipses ajustadas pelo método dos mínimos quadrados usando a rotina em Matlab adaptada de Fitzgibbon (1999). Para a elipse ajustada a indica o semi-eixo maior, b o semieixo menor e ϕ o ângulo de inclinação da elipse com relação ao eixo E-W.

Através do gráfico obtido para o comprimento médio dos blocos não fraturados, no sensor Landsat fica clara novamente a questão da maior quantidade de lineamentos de direção NW estar influenciando esta característica. A elipse ajustada apresenta inclinação de aproximadamente 35°, a partir do eixo E-W, e tem seu eixo maior no quadrante NW. A maior quantidade de lineamentos com esta direção segmentam as linhas de busca gerando blocos menores na direção NE. O ângulo

de inclinação indicado para a elipse é semelhante àquele da insolação nas imagens usadas. Para os lineamentos obtidos com o SRTM90, a elipse ajustada aos dados de comprimento médio tem alongamento maior na direção E-W. Tal característica indica a presença de blocos com maior continuidade nesta mesma direção. A relação, entretanto, dos eixos maiores e menores da elipse ajustada é bastante próxima (ver figura 5.14), fator que indica uma maior homogeneidade nas relações de comprimento e direção dos lineamentos traçados com este sensor.

Como os diagramas para dimensão fractal expressam, para cada classe azimutal, um ajuste ao conjunto de pontos apenas desta classe, em valor adimensional, tornam-se independentes de um padrão (o que não ocorre com as médias de comprimento). Desta forma desconsidera-se o aspecto de maior presença de lineamentos NW no conjunto obtido com Landsat7.

Comparando os diagramas, para os dados obtidos com os dois sensores, podemos observar uma inversão na inclinação dos eixos maiores. Nos dados Landsat7 o eixo encontra-se no quadrante NW e nos dados SRTM90 no quadrante NE, ambos entretanto relativamente próximos ao eixo E-W. A relação de achatamento da elipse, dada pela divisão entre os eixos maiores e menores, é de 1,216 para os dados SRTM90 e 1,307 para aqueles obtidos com Landsat7. Estas características podem estar indicando uma anisotropia direcional na região estudada. Os dois sensores, novamente, podem estar indicando estruturas de diferentes ordens de grandeza. A rotação observada na elipse ajustada poderia estar indicando a relação entre elementos estruturais associados, como indicado na figura 5.5. Uma hipótese, relacionada a uma compressão com tensão principal subhorizontal de direção E-W, com transcorrências dextrais nas estruturas de direção ENE, poderia gerar estruturas escalonadas antitéticas posicionadas em WNW.

5.2 ANÁLISE DOS DADOS GEOFÍSICOS POTENCIAIS

Com o uso de mapas gravimétricos e magnetométricos residuais (ver anexo 2) foi possível observar o comportamento estrutural em subsuperfície, de maneira mais detalhada, e gerar um mapa com feições de primeira ordem de grandeza. Considerando que as análises relacionadas à profundidade das anomalias magnéticas (espectro de potência radial – ver capítulo 3) não apresentaram resultados coerentes, os procedimentos aqui indicados apresentam caráter muito mais qualitativo que quantitativo.

As anomalias Bouguer foram consideradas, dentre os dados obtidos, como aquelas mais representativas das estruturas relacionadas ao contorno estrutural do embasamento. A exclusão das características relacionadas à topografia, na geração destas anomalias, torna-as bastante apropriadas para investigação das características subsuperficiais (Costa e Silva, 1995). O aspecto referente a pouca densidade de estações gravimétricas, e conseqüente amostragem mais regionalizada, destaca as feições de grandes comprimentos de ondas, por sua vez indicando estruturas de maior

profundidade. Da mesma forma, utilizando os dados magnetométricos com maiores continuações ascendentes, destacam-se as estruturas de maior comprimento de onda, relacionadas a maiores profundidades de investigação. Assim, as estruturas descritas como mais profundas, ou envolvendo o embasamento, foram traçadas utilizando-se simultaneamente feições magnéticas (contraste) com continuação para cima de 5000 metros e isolinhas (alinhamentos) de anomalias gravimétricas Bouguer (Figura 5.15a).

Foram também traçadas estruturas utilizando-se os mapas magnéticos com menores continuações para cima (ver anexo 2) e o mapa de anomalias gravimétricas *free-air*. Estas foram denominadas estruturas subsuperficiais intermediárias (Figura 5.15b). Os mapas dos sinais analíticos para as anomalias magnéticas também foram utilizados, desta forma facilitando a centralização das estruturas sobre os seus sinais. Uma ilustração, sintetizando as respostas dos sinais gravimétricos e magnetométricos ao arcabouço geológico-estrutural, é indicada em um modelo hipotético na figura 5.16. Nota-se nas anomalias *free-air* uma grande influência do relevo no sinal obtido, enquanto as anomalias Bouguer representam o contorno estrutural do embasamento, além de possíveis blocos de densidade diferenciada. As anomalias magnéticas indicadas na figura representariam possíveis contrastes entre as interfaces de diferentes suscetibilidades magnéticas. Os comprimentos de ondas maiores indicariam anomalias relacionadas a fontes mais profundas.

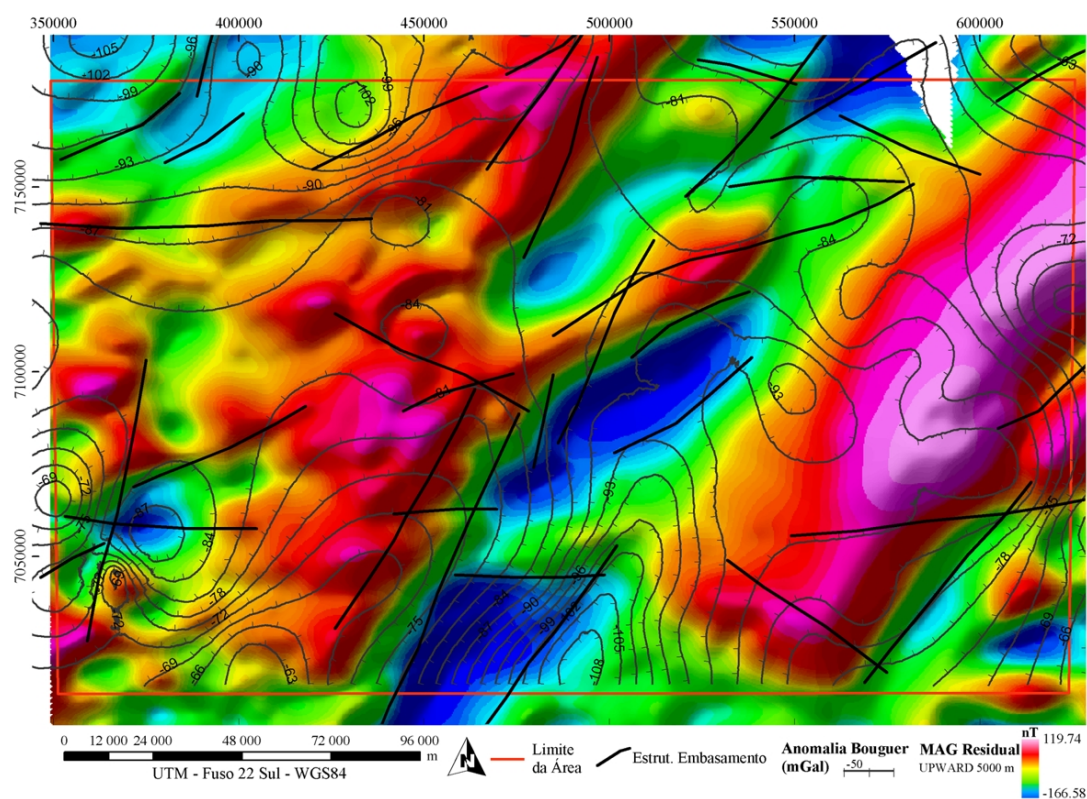


Figura 5.15a – Sobreposição das isolinhas das anomalias *bouguer* aos dados magnéticos com continuação para cima em 5000 metros. As estruturas interpretadas como do embasamento encontram-se indicadas.

Correlacionando as estruturas obtidas com as anomalias Bouguer e os lineamentos indicados por Zalán et al. (1987) observam-se de maneira clara algumas relações. A ZF Lancinha coincide

com altos valores residuais na porção sudoeste da área e segmenta, aproximadamente a partir de seu centro, uma região de baixos valores a sudeste e valores intermediários a noroeste. O Lineamento de Taxaquara correlaciona-se com o limiar de uma região de valores baixos e intermediários na porção noroeste da área de estudo. A ZF de Caçador também apresenta um bom ajuste com o mapa gerado, delimitando a região de altos valores da porção sudoeste da área.

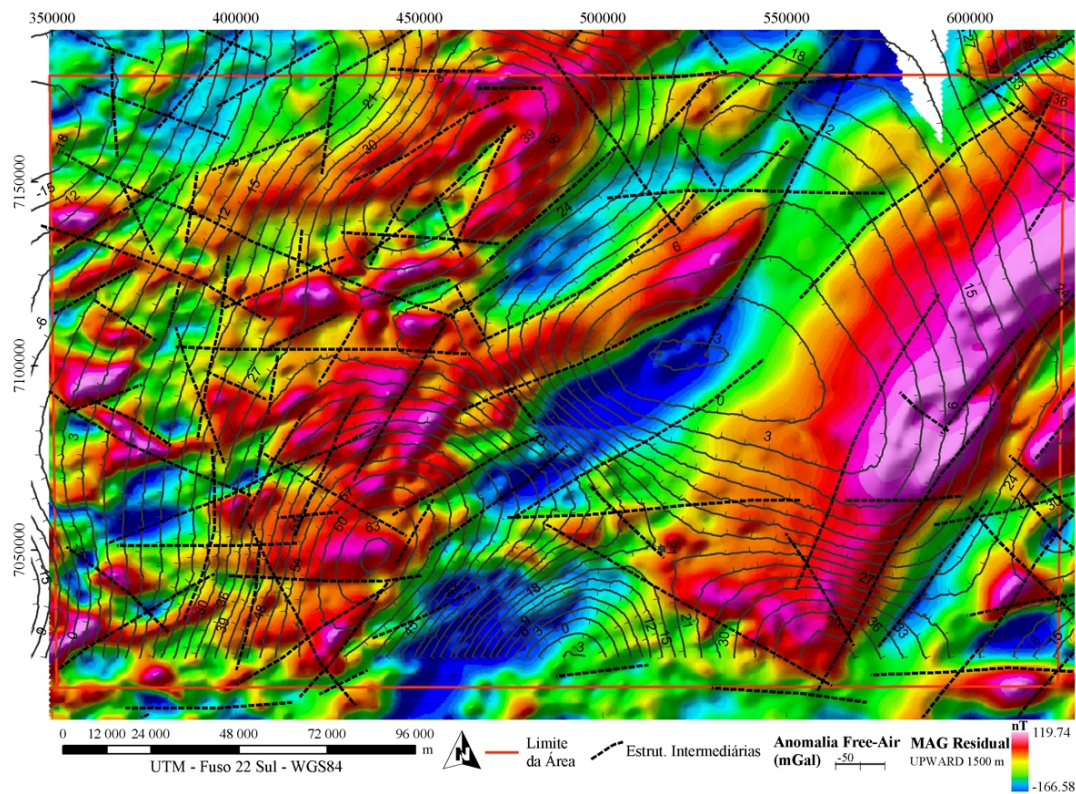


Figura 5.15b – Sobreposição das isolinhas das anomalias *free-air* aos dados magnéticos com continuação para cima em 1500 metros. As estruturas interpretadas como intermediárias encontram-se indicadas.

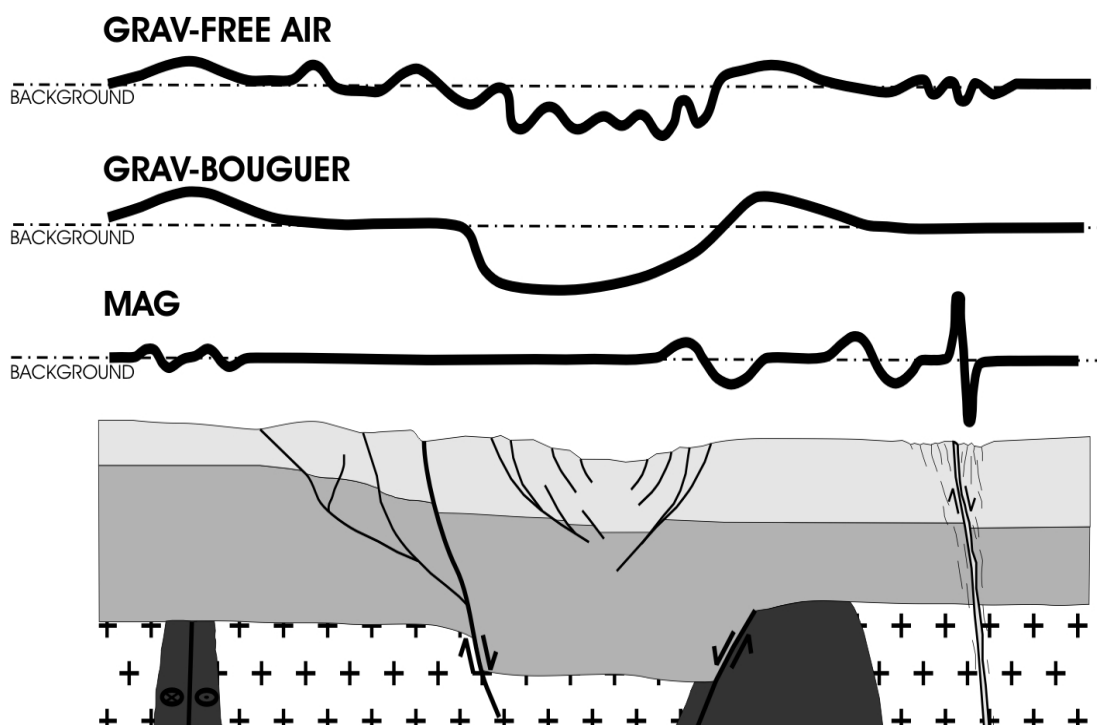


Figura 5.16 – Modelo hipotético indicando as respostas das diferentes anomalias ao arcabouço geológico-estrutural.

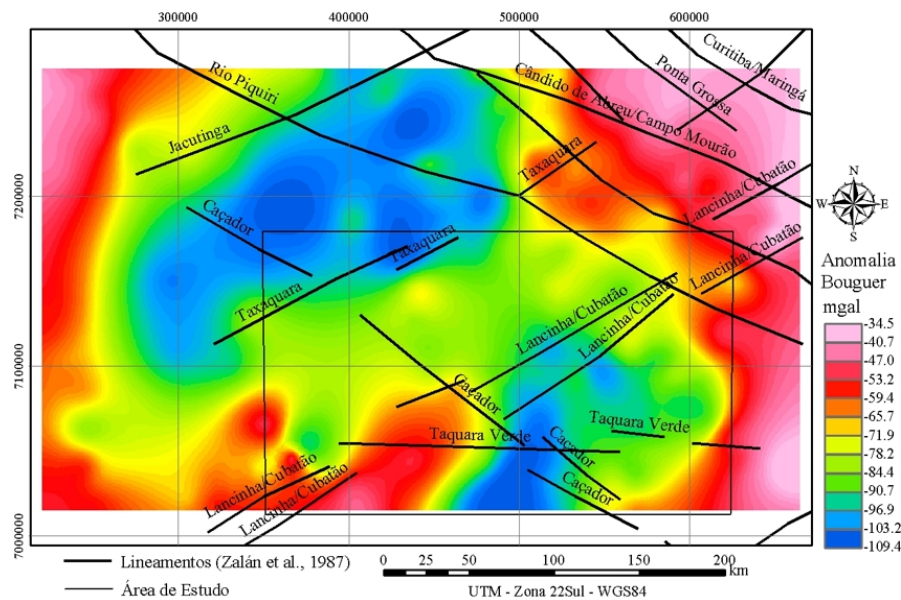


Figura 5.17 – Correlação do mapa Bouguer e estruturas de Zalán et al. (1987).

A correlação com os mapas gerados para o embasamento da Bacia (ver figura 2.8) fica mais evidente quando é observado um ajuste de dados de origens diversas. O bloco cratônico a noroeste da área estudada, indicado por Milani e Thomaz Filho (2000), está, provavelmente, associado ao baixo gravimétrico alongado na direção NE-SW. Aparenta também ter uma correlação com o Lineamento de Taxaquara, de direção análoga.

Ainda com relação aos mapas indicados para o embasamento da bacia e também em análises de estruturas regionais, nota-se uma divergência quanto à direção de continuidade da ZF Lancinha. Para Zalán et al. (1987 e 1990) e Quintas (1995), esta estrutura tem uma linearidade bastante constante em sua direção NE-SW (aproximadamente N50-55E). Soares et al. (1982) e Milani e Thomaz Filho (op. cit), entretanto, indicam uma inflexão desta estrutura para uma direção NNE-SSW a partir, aproximadamente, da região central da área de estudo na porção mais a sul da estrutura. Observando o mapa Bouguer (ver figuras 5.15a e 5.17), nota-se que existem regiões de contraste que satisfazem as duas possibilidades indicadas. Nos mapas magnetométricos (ver figuras 5.15 e 5.16) pode-se notar também esta ambigüidade nos sinais residuais. Há, porém, uma clara disposição de estruturas NNE-SSW na porção centro-oeste da área que, notadamente, segmentam-na em toda sua extensão (ver figura 5.15). A inflexão para a direção NNE-SSW, indicada pelos autores citados, pode então ser resultado de uma interferência destas estruturas na ZF Lancinha. A relação de continuidade observada nas análises executadas com sensores de relevo, tanto a partir das contagens de lineamentos (item 5.1), assim como a interpretação de lineamentos indicam uma continuidade da ZF Lancinha em sua direção NE-SW. Estudando o comportamento desta mesma zona de falha, Oliveira (1991) indica também continuidade desta estrutura na direção NE-SW.

Outro aspecto bastante notável através dos dados magnetométricos é a presença de grandes feições sigmoidais na mesma posição onde Soares et al. (1982) e Milani e Thomaz Filho (2000)

indicam a inflexão para a ZF Lancinha (ver figuras 5.15 e 5.16). Estas feições apresentam uma continuidade NNE-SSW em toda porção central da área estudada. Podem ser indicativas de movimentação, como apresentado na figura 5.18. As exposições são bastante subjetivas. Um maior aprofundamento faz-se necessário para validação de algum modelo às geometrias observadas.

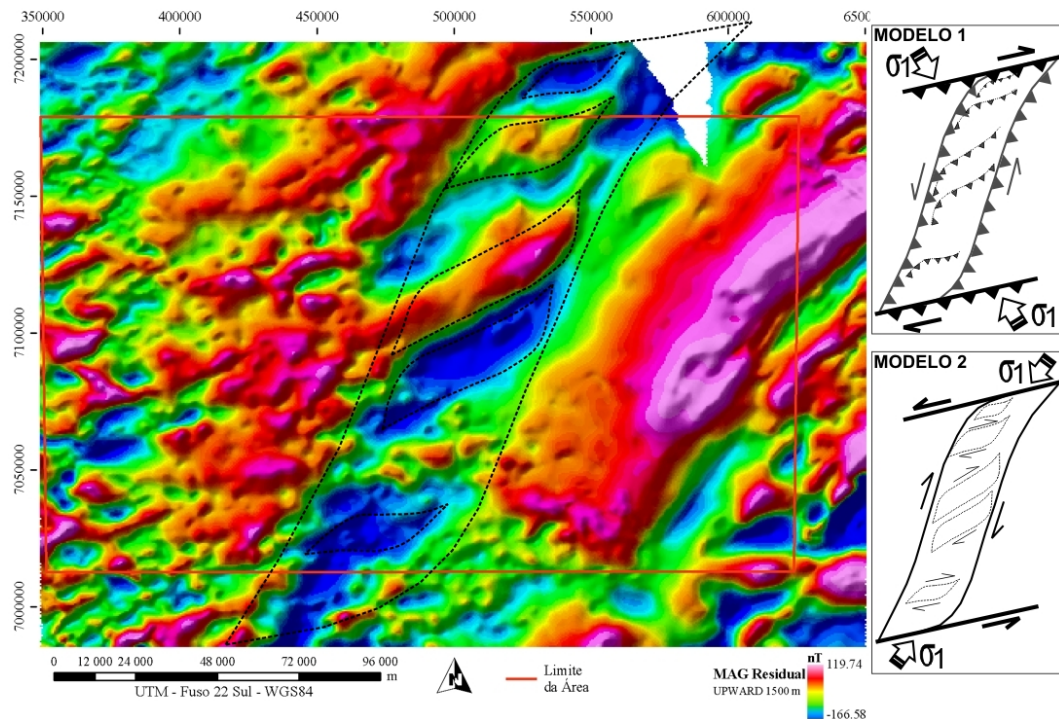


Figura 5.18 – Possível feição estrutural sigmoidal observada na área de estudo.
Dois modelos indicados para as geometrias observadas.

5.3 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Além da observação de indicadores cinemáticos, para auxílio à compreensão da evolução dinâmica da área estudada, os dados de campo promoveram mais uma escala de observação para as estruturas rúpteis estudadas. As informações aqui apresentadas estão inseridas em dois subitens. No primeiro é apresentada uma análise descritiva, onde são indicados aspectos direcionais e geométricos das estruturas. No segundo subitem é mostrada uma análise dinâmica, buscando indicar eventos tectônicos envolvidos na evolução estrutural da área.

5.3.1 Análise descritiva e cinemática

Os levantamentos de campo tiveram por objetivo principal a observação de estruturas para auxílio na compreensão dinâmica da área estudada. Através, entretanto, destes levantamentos, foi possível observar aspectos e estilos estruturais nas diferentes unidades geológicas estudadas.

De maneira geral os afloramentos das rochas básicas da Formação Serra Geral, diques e soleiras associados (geralmente cortes de estrada e pedreiras), são aqueles que apresentam melhor qualidade e maior quantidade de informações estruturais. Os indicadores cinemáticos, nestas rochas,

são normalmente estrias e degraus associados a crescimento de calcita fibrosa nos planos de fratura (Figura 5.19a). Foram também observadas estrias e degraus associados a óxidos de manganês e de ferro (Figura 5.19b). Fraturas escalonadas e juntas plumosas também ocorrem (Figuras 5.19c e 5.19d, respectivamente), porém de maneira mais restrita. Preenchimentos por calcita e óxidos também são comuns em fraturas sem indicação cinemática nestas rochas.

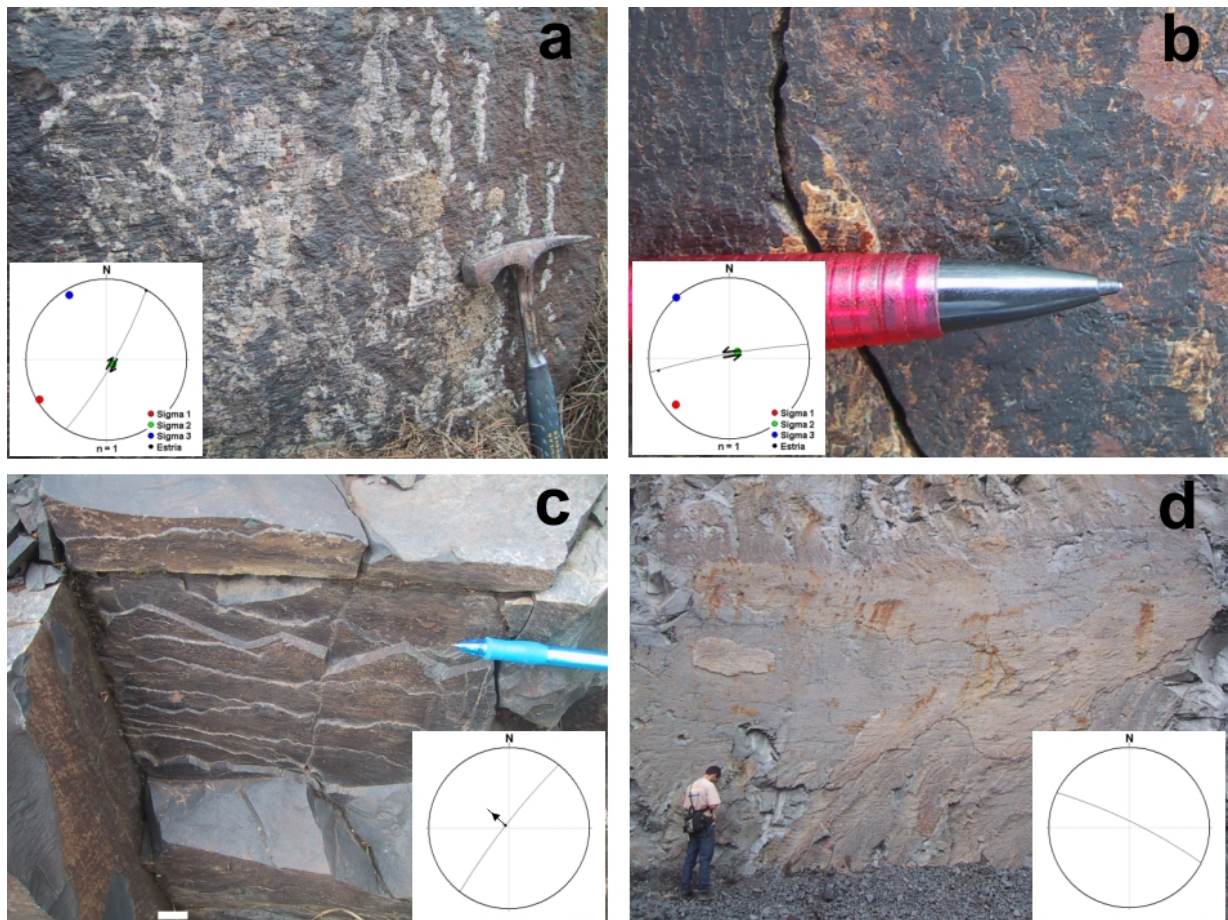


Figura 5.19 – Indicadores observados nas rochas básicas da Formação Serra Geral.

- a - estrias e degraus, indicando movimento dextral, associados a calcitas (ponto 1-14);
 b - estrias e degraus, indicando movimento sinistral, associados a películas de óxido (ponto 3-8);
 c - fraturas escalonadas, indicando movimento normal (ponto 1-15); d - junta plumosa (ponto 3-6).

Nas unidades sedimentares os principais indicadores cinemáticos observados são fraturas escalonadas (Figura 5.20a). Pares conjugados de fraturas (5.20b) também são estruturas relativamente comuns nestas unidades. Degráus e estrias em falhas são bastante raros e, normalmente, de difícil observação (5.20c). São ainda encontrados deslocamentos de camadas (5.20d). A recorrência de eventos nestas unidades, com superimposição de estruturas, muitas vezes parece mascarar os registros estruturais.

Estruturas em flor ocorrem em diversas unidades e normalmente estão indicando regime transcorrente compressional (falhas em flor positivas). Localmente, porém, podem representar a partição da deformação associada a sistemas transtensionais regionais. Exemplos de estruturas deste tipo podem ser observados na figura 5.21.

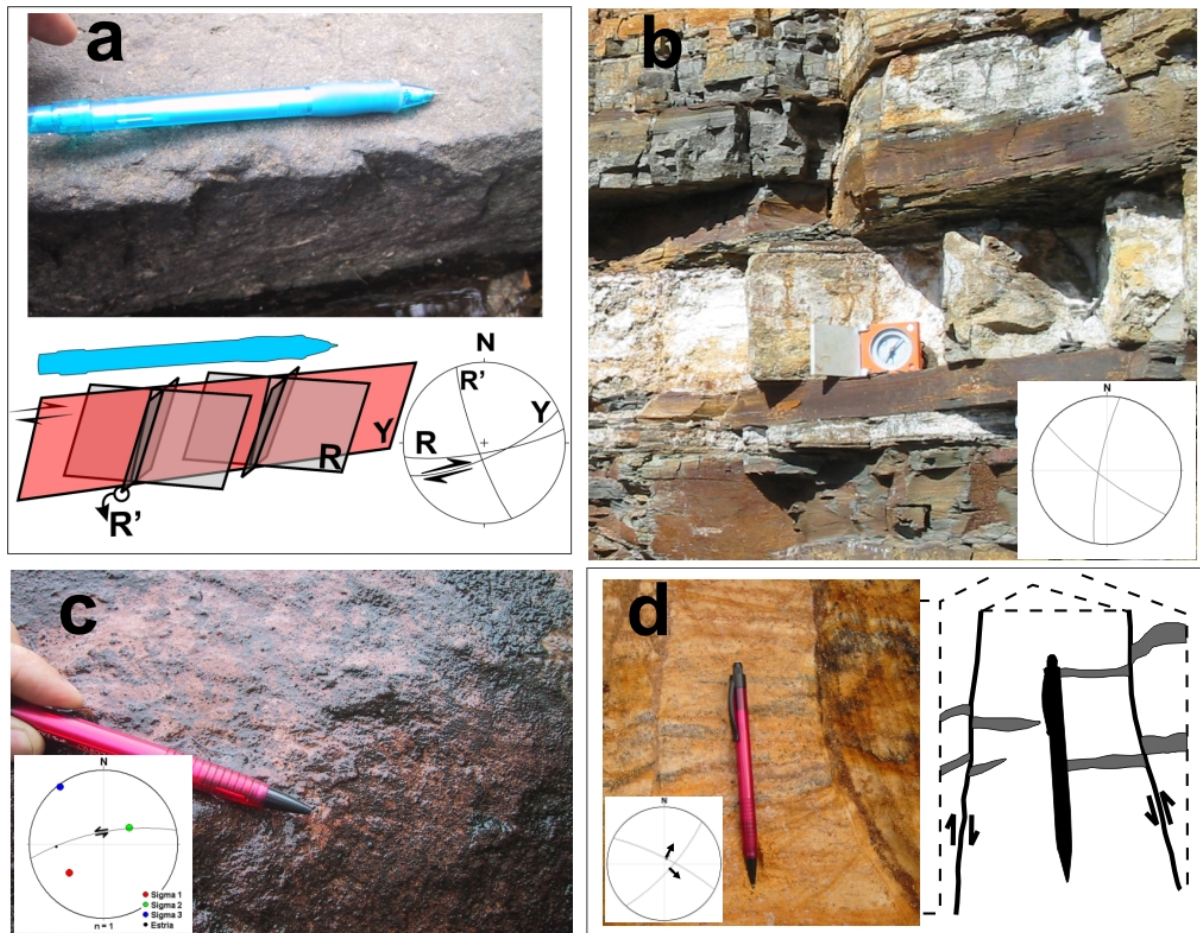


Figura 5.20 – Indicadores observados nas rochas sedimentares. a - fratura escalonada dextral e elementos interpretados (ponto 1-10); b - pares conjugados de fraturas (ponto 2-2); c - Estrias e degraus indicando movimento sinistral (ponto 3-1); d - deslocamento de camadas indicando movimento normal (ponto 2-11).

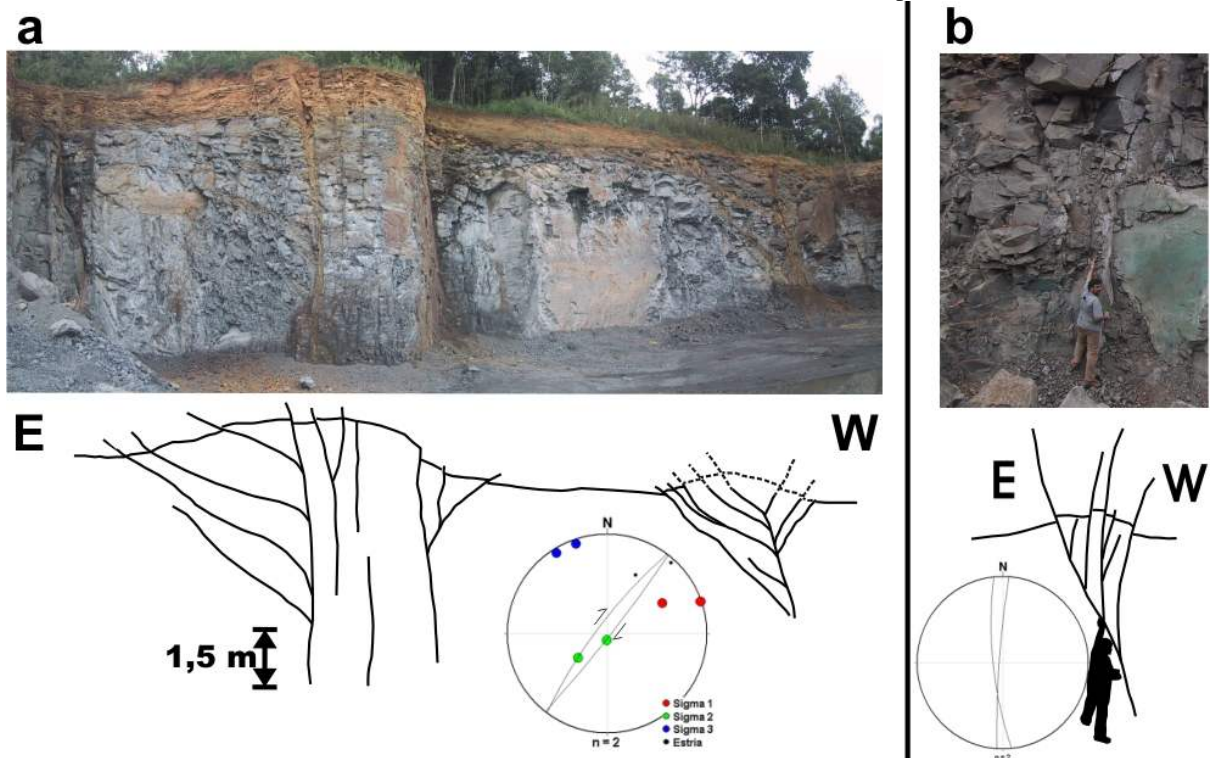


Figura 5.21 – Estruturas em flor positivas.

a - estruturas em flor em diamictito do Grupo Itararé (ponto 3-3). Notar caráter assimétrico nos ramos a oeste e a leste, indicando vergência das estruturas para leste; b - falha em flor em basalto da Formação Serra Geral (ponto 1-18).

Localmente foram observadas, associadas a grandes vales, falhas com rejeitos superiores a 10 metros. No ponto 2-13 uma falha normal, de direção aproximada N35W, coloca em contato lateral as formações Rio do Rasto e Pirambóia/Botucatu (Figura 5.21). Estas estruturas estão posicionadas junto à Escarpa do Segundo Planalto (“Escarpa Devoniana”) e apresentam-se regionalmente associadas a faixas de terrenos com declividades acentuadas.

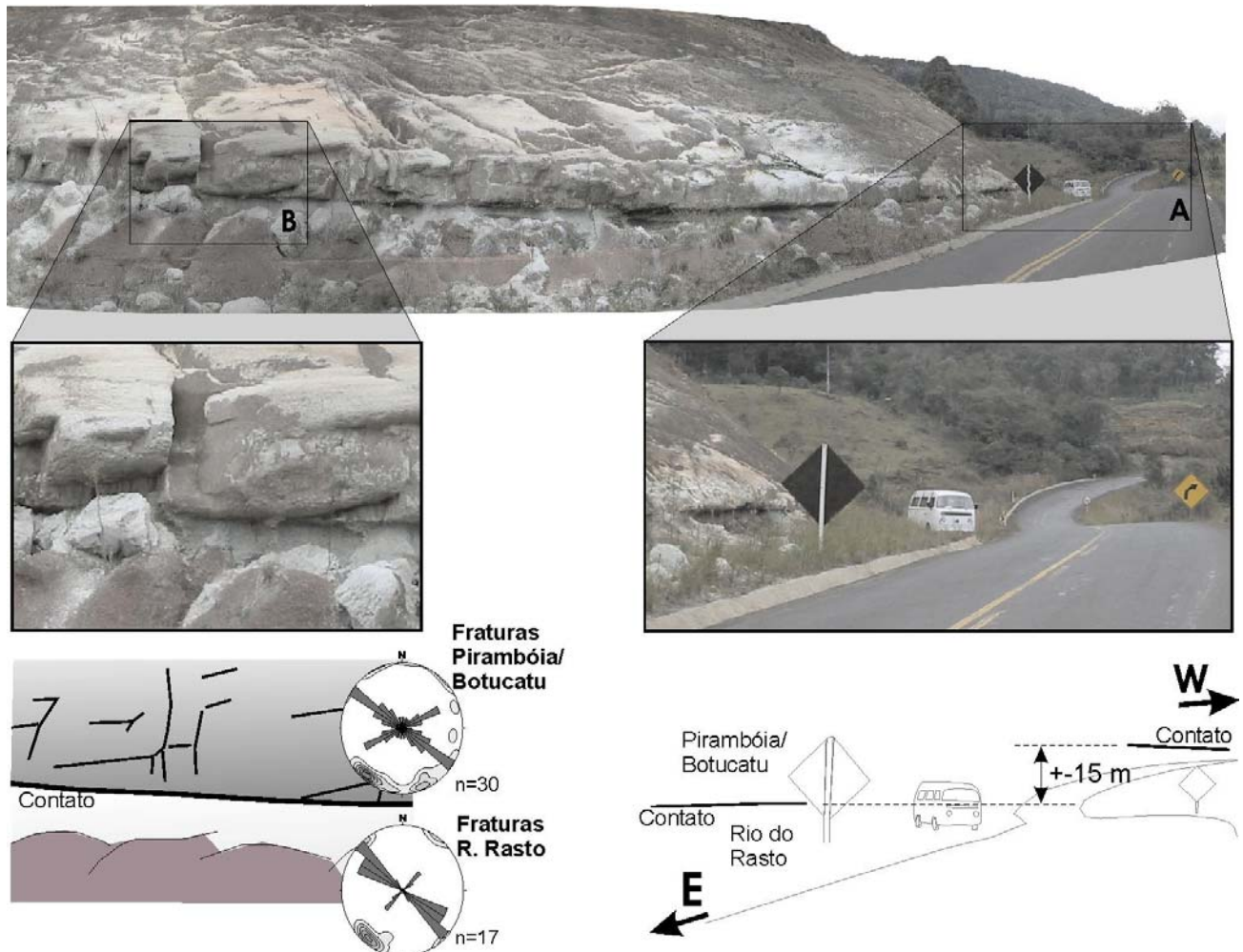


Figura 5.21 – Falha com rejeito vertical de aproximadamente 15 metros (ponto 2-13)

Ainda para a análise descritiva, foram gerados estereogramas para grandes grupos de estruturas coletadas. Através de uma análise preliminar com todo o conjunto de dados (Figura 5.22), observa-se uma moda direcional principal em N50-80W e outras duas em N40-50E e N70-80E. O intervalo compreendido entre as direções NNE até aproximadamente N40-50W apresenta as menores concentrações de estruturas medidas em campo. Através dos contornos dos pólos dos planos fica claro o caráter subvertical para a maioria das fraturas medidas.

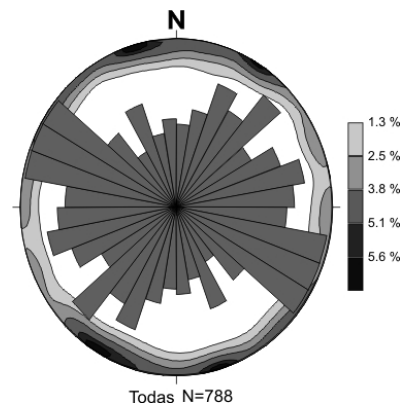


Figura 5.22 – Diagrama para todas as fraturas amostradas na área.
Rosetas indicam a direção dos planos e os contornos representam o pólo dos mergulhos.

Com a divisão dos dados segundo as unidades estratigráficas (indicadas na figura 3.26), observam-se algumas características referentes a agrupamentos preferenciais de estruturas segundo os diferentes níveis investigados (Figura 5.23). Nas unidades compreendidas do Carbonífero ao Permiano Médio (Grupos Itararé e Guatá) nota-se uma maior tendência a estruturas com direção NE, enquanto nas unidades compreendidas entre o Permiano Superior e Cretáceo as maiores concentrações apresentam-se no quadrante NW.

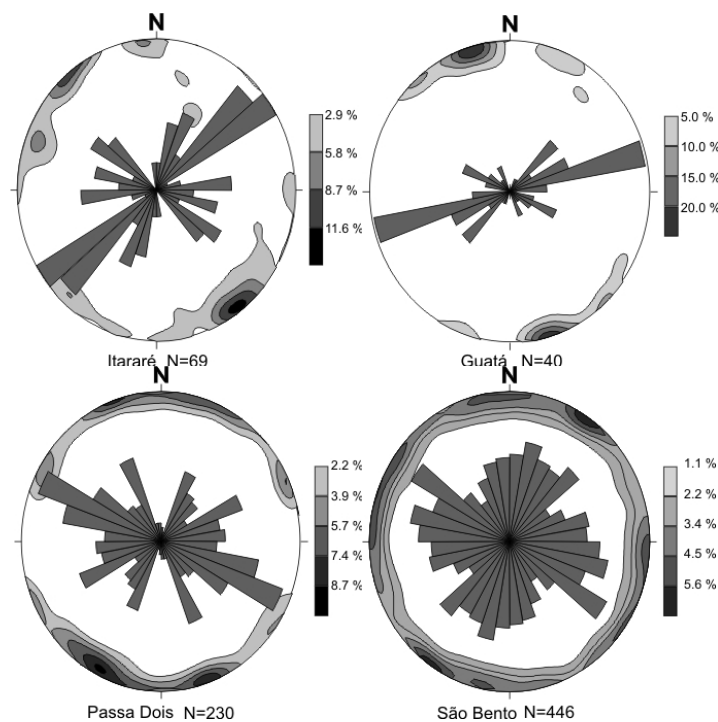


Figura 5.23 – Diagramas para as fraturas segundo intervalos estratigráficos.

Devido, entretanto, à distribuição irregular na quantidade de dados obtidos nas diferentes unidades geológicas envolvidas, torna-se inviável analisá-los através de agrupamentos deste tipo. Para uma investigação mais detalhada, segundo as diversas unidades, seria necessária uma maior homogeneidade na quantidade de informações para cada uma delas. Desta forma as análises serão executadas a partir de critérios de posicionamento estrutural, com os dados agrupados através de suas relações a grandes estruturas observadas (Figura 5.24).

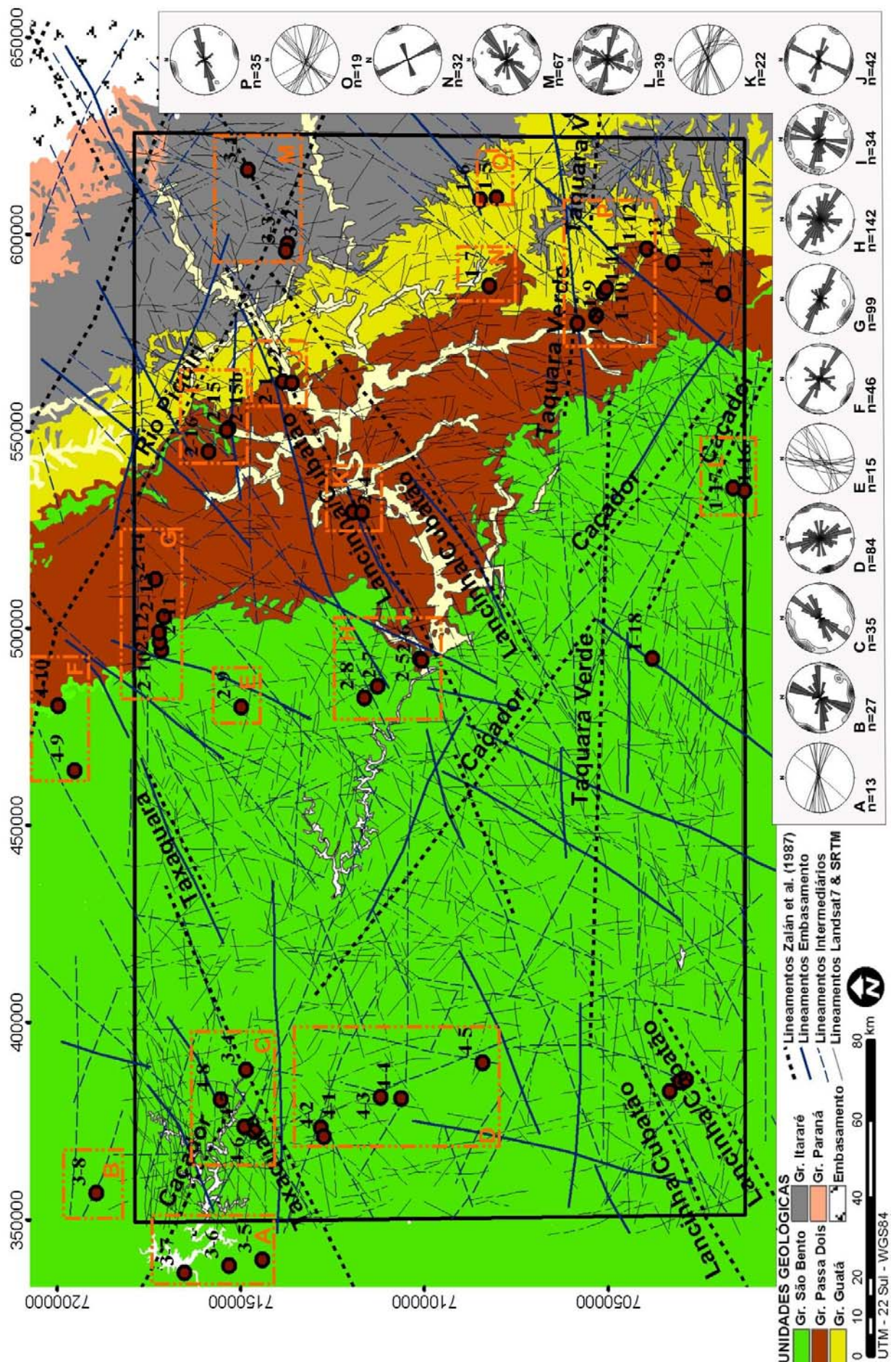


Figura 5.24 – Mapa de lineamentos e diagramas das estruturas rúpteis observadas em campo.

Por intermédio do agrupamento de estruturas, observa-se variação nas atitudes das fraturas ao longo de grandes lineamentos. As características direcionais apresentam, conforme observado nos diagramas, rotação local referente a aspectos diversos. Na ZF Lancinha, por exemplo, fica clara a influência de outros lineamentos nas respostas dadas pelas fraturas analisadas em sua zona de influência. Este fato já havia sido observado por Oliveira (1991), onde a autora indica interferência principalmente quando a ZF Lancinha está próxima a estruturas regionais de direção E-W. Nos diagramas gerados com atitudes de fraturas dos pontos 2-5 a 2-8 (aproximadamente no centro da área de estudo) observa-se uma moda de estruturas N-S, claramente influenciadas por falhas em *relay* de mesma direção (indicadas na figura 5.24 através dos sensores SRTM90 e Landsat7).

Na ZF de Caçador esta mesma característica (variação nas atitudes devido à interferência de falhas de outras direções) pode ser observada quando comparamos estruturas coletadas nos extremos da área de estudo. Na porção sul-sudeste da área (pontos 1-16 e 1-17) ocorrem fraturas, principalmente, de NNE a NNW e também uma concentração em WNW. Neste local observa-se um grande *trend* de lineamentos (SRTM90 & Landsat7) de direção N-S, provavelmente relacionados às estruturas NNW a NNE observadas nos diagramas. Já na porção noroeste da área (pontos 3-4, 4-6, 4-7 e 4-8) observam-se fraturas nas direções NE e também ENE. Aqui talvez a influência seja devida a ZF de Taxaquara, esta de direção principal N50-60E. Ainda próximo à ZF de Caçador, na porção noroeste (pontos 3-5, 3-6 e 3-7) ocorre presença de estruturas de direção ENE a WNW. Estas estruturas também são observadas através dos sensores Landsat7 e SRTM90. Esta tendência local E-W pode ser reflexo do bloco cratônico apontado por Milani e Thomaz Filho (2000) posicionado na mesma região indicada (ver figura 2.8). Os mapas de anomalias Bouguer e magnetométricos também apontam domínios geofísicos anômalos para a área indicada (ver figuras 5.15 e 5.16).

Outras respostas semelhantes a estruturas observadas com os sensores geofísicos são também claras na porção oeste da área. O diagrama elaborado com estruturas dos pontos 4-1 a 4-5 aponta moda principal na posição NNW. Esta é a mesma orientação da estrutura observada com dados aeromagnéticos para o local indicado. O diagrama elaborado para os pontos 1-9 a 1-12 (sudeste da área) indica concentração de fraturas com direções E-W. Através das interpretações dos dados geofísicos, bem como com os sensores de superfície, observam-se feições de mesma orientação na área indicada. Esta direção, regionalmente, também já foi observada no trabalho de Zalán et al. (1987), onde descreve a ZF Taquara Verde.

5.3.2 Análise dinâmica

Esta análise baseia-se em dados planos de falhas contendo estrias e degraus, coletados em 21 pontos distintos, perfazendo um total de 54 indicadores. Os dados foram agrupados segundo critérios estruturais (próximos a grandes falhas regionais) e também por unidades estratigráficas. O critério utilizado para indicação das tensões máximas, intermediárias e mínimas é o de Mohr-Coulomb, tratado no item 4.2.1 deste trabalho, com o *software* Sigmas. A classificação sistemática para as fraturas é baseada no modelo clássico de Riedel para cisalhamento simples (Woodcock e Schubert, 1994) indicado na figura 5.25.

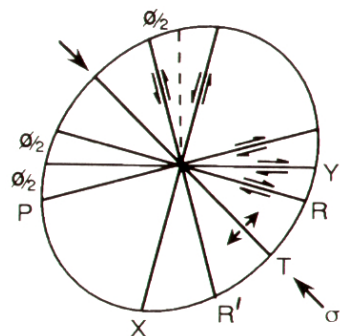


Figura 5.25 – Fraturas geradas durante cisalhamento simples (Woodcock e Schubert, 1994).

Através da análise de todo o conjunto de dados (Figura 5.26) observam-se duas concentrações principais para as tensões máximas (σ_1) calculadas. Uma concentração maior, com direção ENE e outra, de menor magnitude, com direção NNW. Estas direções, designadas como σ_1 -I e σ_1 -II, assemelham-se às fases deformacionais *D1* e *D2* definidas por Strugale (2002), ao estudar o Grupo São Bento na região do Arco de Ponta Grossa. Este autor definiu para estes eventos idades eo-cretácea e neo-cretácea a terciária. O evento *D2* definido por Strugale (Op. Cit) apresenta, entretanto, σ_1 mais concentrado próximo à direção E-W. Os dados indicados em σ_1 -II, aqui com maior espalhamento, podem estar relacionados à rotação associada à Placa Sul-americana durante a abertura do Oceano Atlântico, ou ainda a um terceiro episódio tectônico.

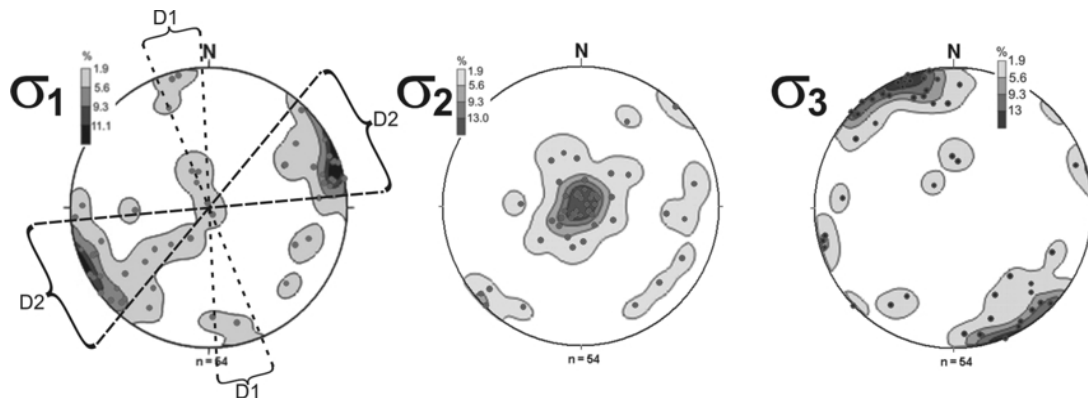


Figura 5.26 - Tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 calculadas e indicação de duas concentrações principais observadas.

Outro aspecto observado através desta análise, é uma possível oscilação da tensão principal σ_1 -II (*D2*). Nos pontos indicados 1-8, 1-14 e 1-17 (ver localização na figura 5.24) foram observadas

falhas normais e dextrais de direção NE. As tensões σ_1 calculadas para as falhas transcorrentes (pontos 1-14 e 1-17) apresentam direções NE a ENE, compatível com σ_2 calculado para as falhas normais (ponto 1-8). As tensões σ_3 permanecem posicionadas de NNW a NW (Figura 5.27). Estas relações podem estar indicando uma variação de σ_1 para σ_2 . Este mesmo aspecto pôde ser observado no ponto 3-8, onde em mesmos planos foram observados indicadores transcorrentes e normais (Figura 5.28). Fatores relacionados a reajuste de blocos, por aumento na taxa de sobrecarga, podem afetar o condicionamento de tensões associado ao regime transcorrente de caráter principal. Desta forma σ_1 posicionaria-se próximo à vertical, e a tensão intermediária σ_2 passaria a ocupar a posição inicial de σ_1 , na direção ENE. Distensões, associadas à Z.F. Lancinha, com movimentos normais e σ_3 posicionado a NW-SE já haviam sido observados por Oliveira (1991).

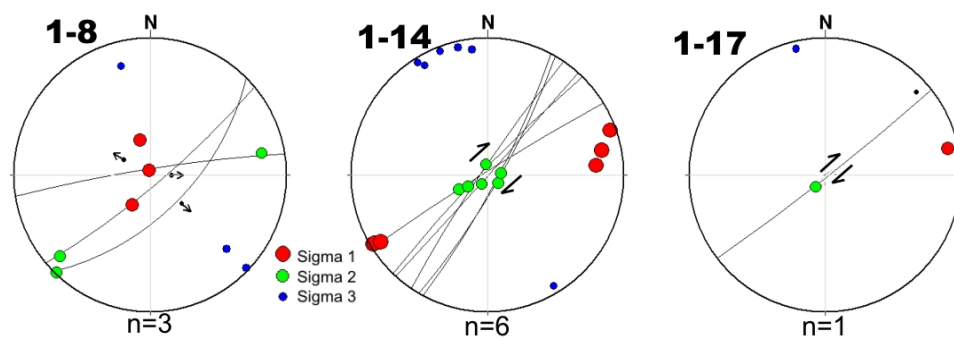


Figura 5.27 – Tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 calculados para os pontos indicados.



Figura 5.28 – Variação entre σ_1 e σ_2 (ponto 3-8).

Através da divisão dos dados conforme seu posicionamento estratigráfico, foram elaborados dois diagramas para tensões máximas, intermediárias e mínimas para as unidades paleozóicas e mesozóicas (Figura 5.29). A direção anteriormente indica como σ_1 -I (*D1* com direção NNW) é observada somente nas unidades mesozóicas, enquanto nas unidades paleozóicas nota-se grande concentração para tensão principal apenas na direção E-W a NE (σ_1 -II ou *D2*). Desta forma, infere-se que o evento indicado σ_1 -I pode ter influência mais sutil que σ_1 -II, estruturando, na área de estudo, mais intensamente apenas a porção superior, mais rúptil, da seção sedimentar.

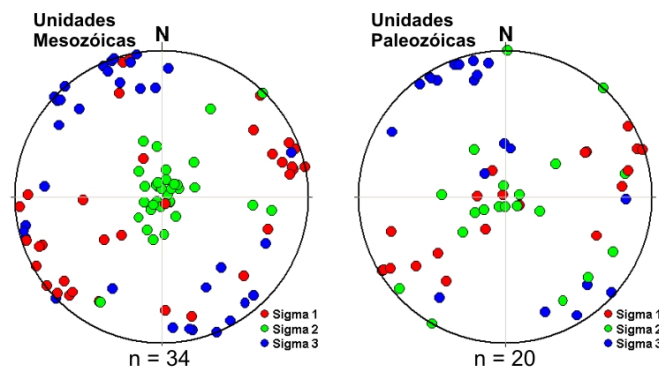


Figura 5.29 – Tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 calculadas para os dados obtidos nas unidades mesozóicas e paleozóicas.

5.4 ANÁLISE INTEGRADA

Através de dados gerados por outros autores (Soares et al., 1984; Zalán et al., 1987; Quintas, 1995; Milani e Thomaz Filho, 2000) e do uso de dados geofísicos potenciais (MAG e GRAV), pôde-se observar o comportamento das grandes estruturas da bacia na área de estudo. Nota-se que, em seu embasamento, a área é segmentada em dois grandes blocos através da Zona de Falha Lancinha-Cubatão, de direção NE. Os mapas de isólitais (formações Rio Bonito e Irati) e de migração de hidrocarbonetos, associados aos megalineamentos observados para a bacia (Figura 5.30), aparecem com claro controle em seus contornos, dado principalmente pelas estruturas de direção NE e NW e, localmente, por estruturas E-W.

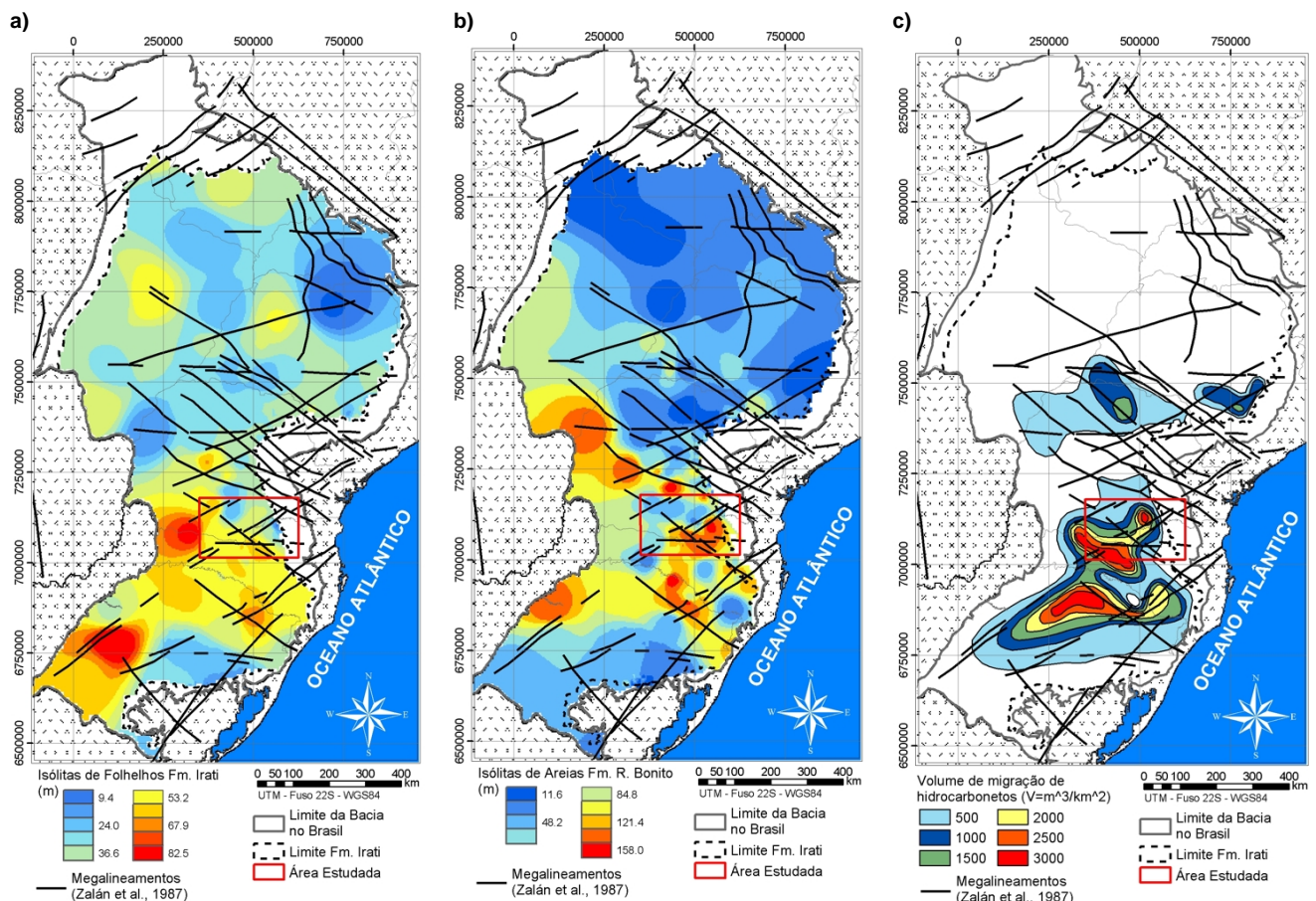


Figura 5.30 – a) Isólitais de folhelhos para a Fm. Irati; b) Isólitais de areia para a Fm. Rio Bonito; c) Volume migrado de hidrocarbonetos devido ao efeito térmico da intrusão de rochas ígneas na Formação Irati (adaptado de Araújo et al., 2000). Os megalineamentos de Zalán et al (1987) encontram-se sobrepostos aos mapas.

Através da integração dos dados interpretados, a partir dos diferentes sensores remotos analisados, foi possível a geração de um mapa litoestrutural, contendo informações diversas do arcabouço estrutural da área estudada (Anexo 6). Neste mapa estão indicadas as diversas estruturas interpretadas, demonstrando o comportamento nos diferentes níveis avaliados. São também demonstrados diferentes comportamentos direcionais das estruturas, conforme intervalos estratigráficos distintos, além de atributos obtidos com os lineamentos analisados. Desta forma pode-se ter uma melhor compreensão generalizada do envelopamento estrutural na área analisada.

Nota-se para os dados interpretados a partir dos dados geofísicos potenciais (Figura 5.31) e também com os sensores de superfície (Figura 5.32), de maneira geral, cinco direções principais de estruturas regionais na área de estudo. Um padrão a aproximadamente N60-70E bastante contínuo (traçados longos) e penetrativo e outro N30-40E com traçado um pouco mais segmentado. Padrão NNE a NNW, anastomosado e de traçado contínuo. No quadrante NW ocorrem estruturas com padrão em *relay* (estruturas com traços mais curtos e paralelos), com direções variadas, persistentes em quase toda a área. Na direção E-W ocorrem estruturas de grande continuidade, porém restritas a “corredores” (de Freitas e Rostirolla, 2005). Abstraindo-se da característica de profundidade das estruturas interpretadas com os sensores, e destacando feições de maior continuidade, foi então elaborado um mapa com as principais feições estruturais da área estudada. Estas feições estão indicadas na figura 5.33, onde são classificadas como lineamentos de 1ª e 2ª ordens segundo suas maiores ou menores influências nos diversos níveis investigados.

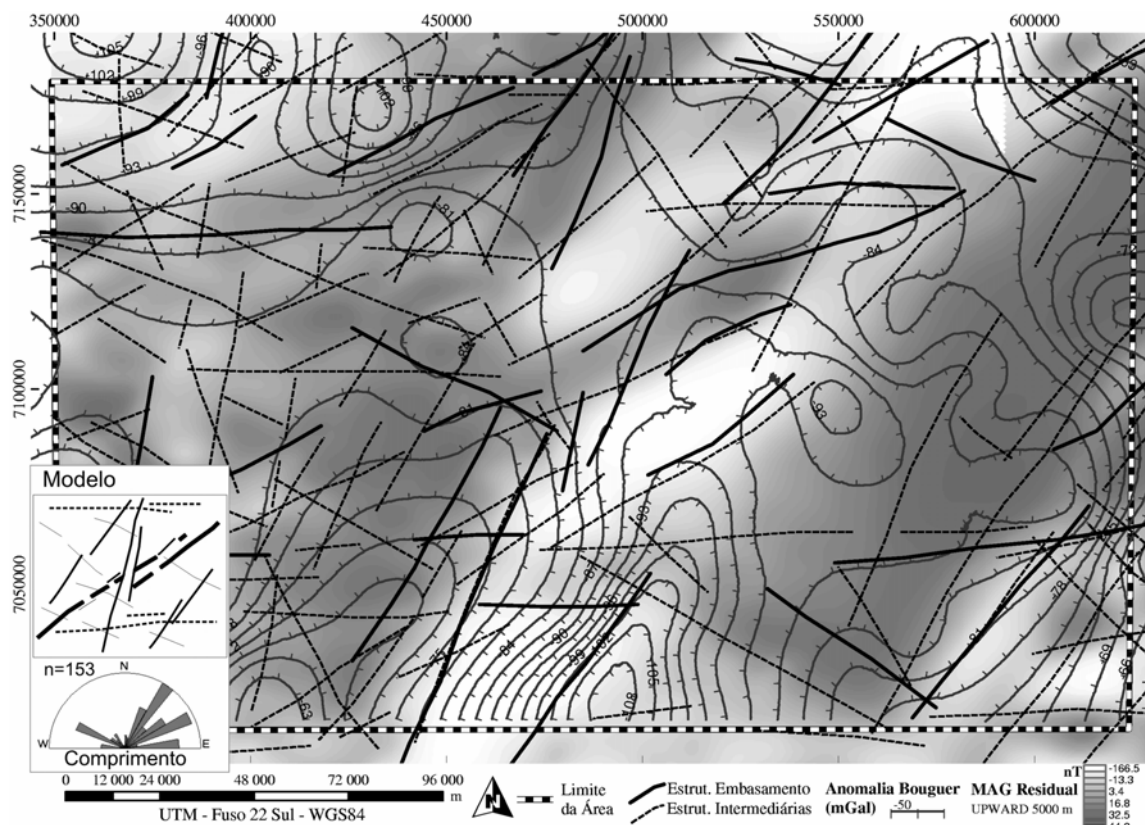


Figura 5.31 – Estruturas de subsuperfície obtidas a partir dos dados geofísicos potenciais.

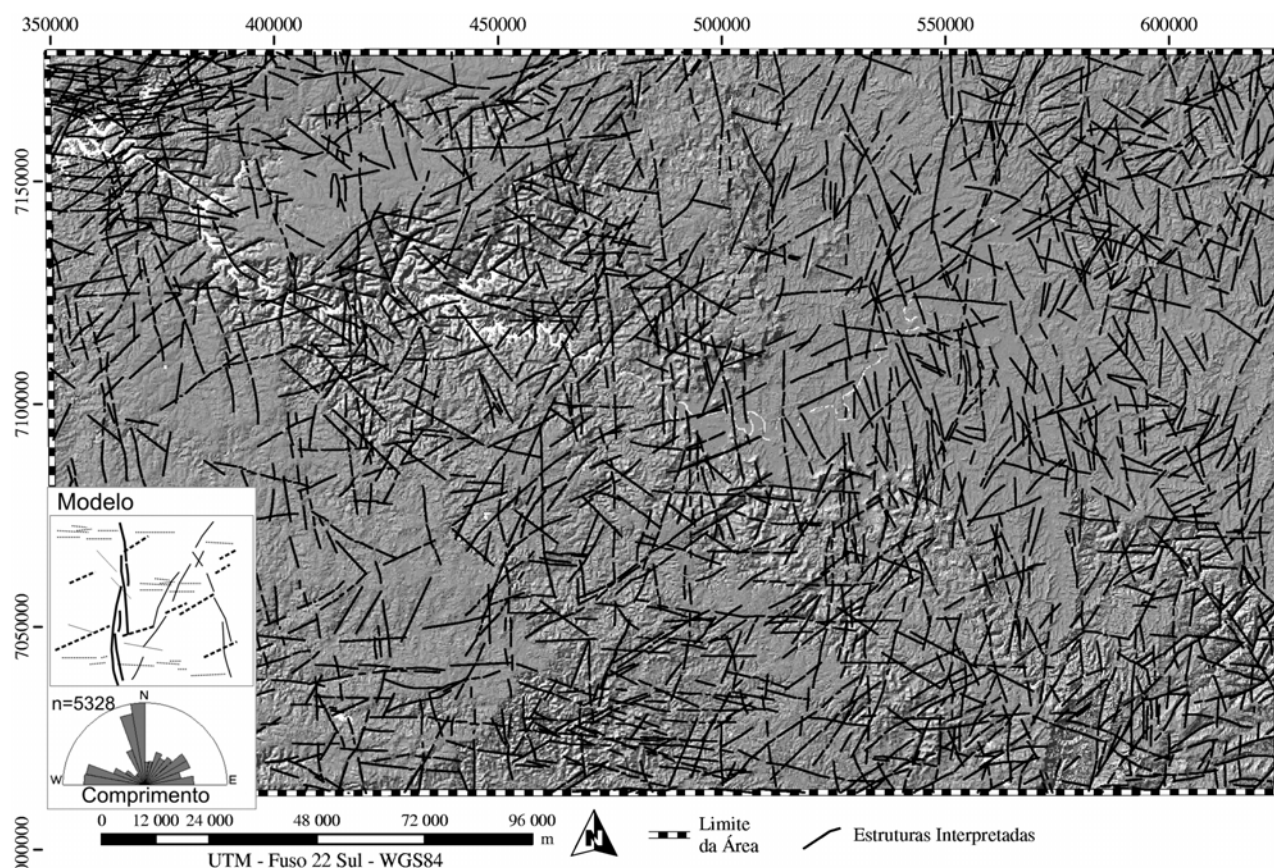


Figura 5.32 – Estruturas interpretadas a partir das imagens Landsat7 e do MDE SRTM90. Em segundo plano modelo sombreado (iluminação a N45W) do SRTM90.

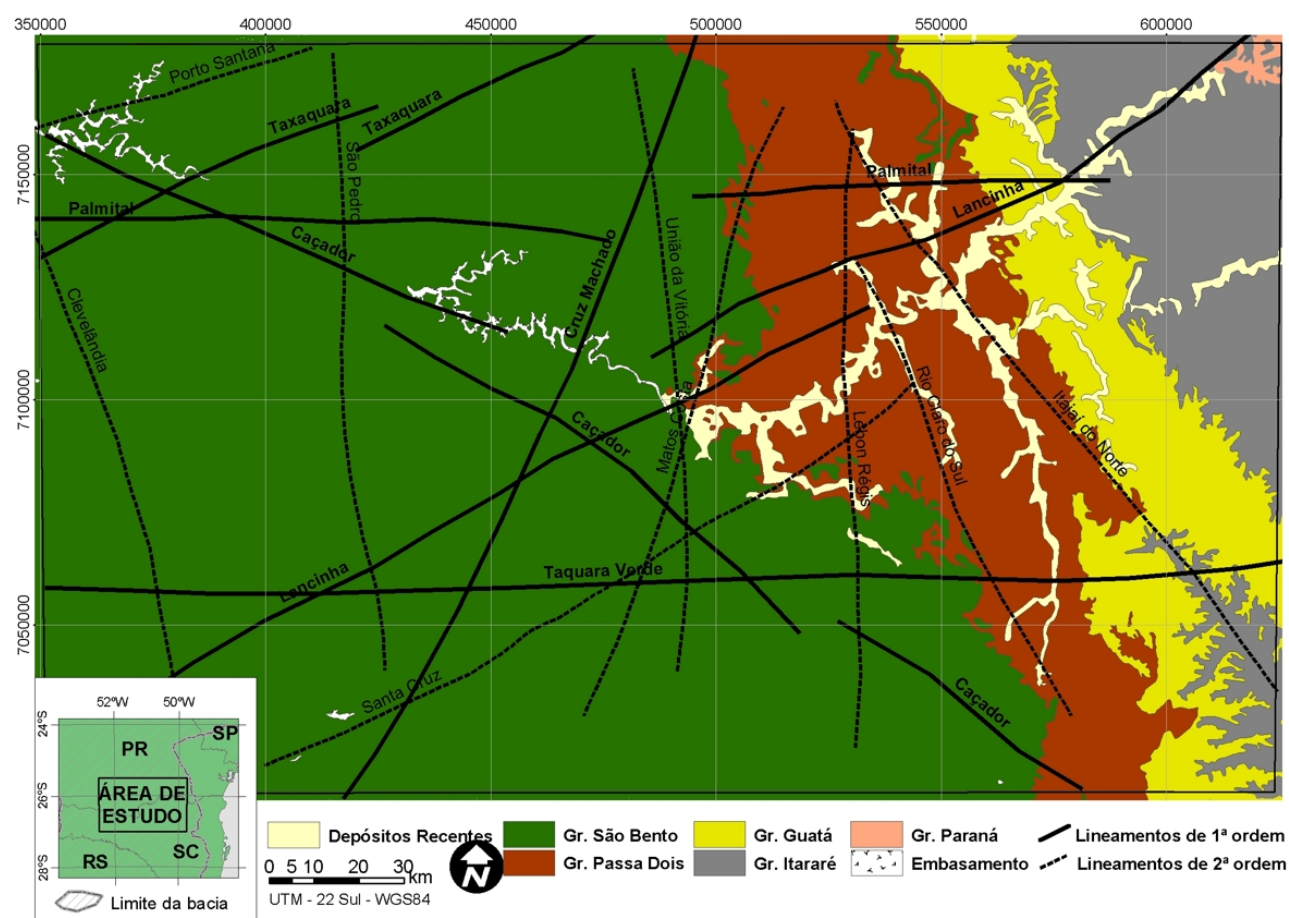


Figura 5.33 – Principais feições lineares observadas na área estudada.

Todas as direções regionais indicadas, exceto o padrão N-S, parecem ocorrer nos diversos níveis investigados (sensores de superfície e subsuperfície). Esta característica pode ser relacionada à herança de estruturas do embasamento. Sendo as estruturas N-S neoformadas, em relação às outras direções indicadas, aventa-se aqui à possibilidade de terem sua origem relacionada a uma flexura crustal da Placa Sul-americana, associada à subducção oceânica a oeste. A partir do início do Cenozóico este esforço poderia gerar um arqueamento progressivo da placa continental, onde as rochas das seções superiores da bacia, com características mais rúpteis, estariam sujeitas a rupturas com direção preferencial N-S, anastomosadas e contínuas por grandes distâncias (ver figura 5.32). Um esboço desta hipótese é ilustrado na figura 5.34, onde se faz uma analogia ao perfil altimétrico para a porção meridional, correlata à área estudada, do continente sul-americano.

Estas estruturas N-S podem ter sua geração associada ao rifteamento cretáceo, ocorrido durante a abertura do Atlântico Sul. Seriam relacionadas ao movimento distensional e rotacional associado a este evento. Nesta hipótese, ocorreria uma propagação das estruturas distensionais na direção oeste, adentrando à Placa Sul Americana. Estudando a evolução tectônica da Bacia de Santos, Macedo (1989) indica a possibilidade de grandes falhas lítricas ocorrerem durante esta fase. Estas feições estruturariam porções basais da Bacia do Paraná (Figura 5.35) e, posteriormente, através de reajuste de tensões, gerariam estruturas de direção N-S, observadas na bacia.

Segundo Rostirolla et al. (2005), estruturas de direção N-S poderiam estar associadas à evolução cenozóica da Placa Sul Americana. Seriam estruturas frontais às tensões horizontais máximas com direção E-W, e estariam balizadas por grandes eixos indicados por domínios altimétricos, alongados na direção N-S.

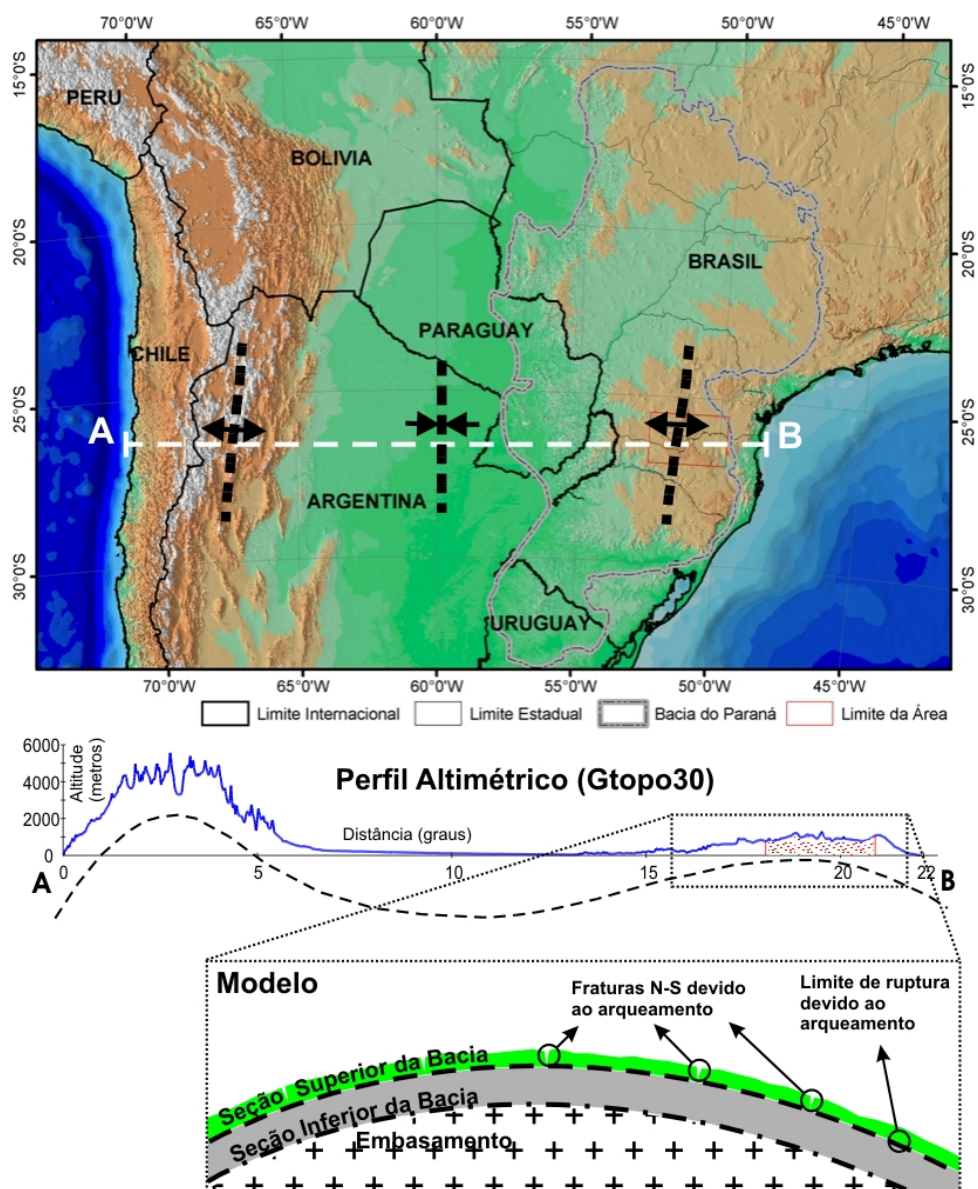


Figura 5.34 – Modelo para geração das fraturas N-S devido à flexura da Placa Sul-americana. Maiores detalhes apresentam-se indicados no texto.

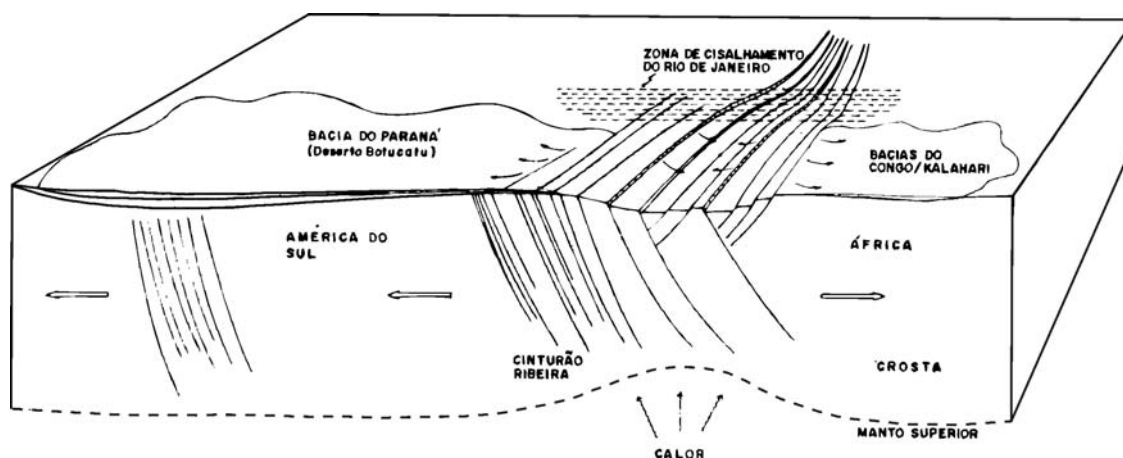


Figura 5.35 – Desenvolvimento de estruturas devidas à distensão da Placa Sulamericana durante o Mesozóico. Fonte: Macedo (1989).

6 IMPLICAÇÕES DAS ANÁLISES EXECUTADAS NO S.P. IRATI - RIO BONITO

Através das análises indicadas no capítulo anterior, por meio de técnicas diversas, foi observado que as respostas obtidas a partir dos lineamentos traçados com os sensores Landsat7 e SRTM90 representam diferentes características direcionais, quando comparados. Devido às diferentes resoluções das imagens SRTM e Landsat7, os resultados obtidos foram considerados como representativos de ordens de grandeza distintas. O MDE SRTM é mais sensível a estruturas de maiores ordens de grandeza (1ª e 2ª ordens), enquanto as imagens Landsat7 apresentam maior detalhamento de feições de menores ordens (2ª e 3ª ordens), porém relacionadas aos mesmos sistemas tectônicos, relativos a cada fase deformacional. A percepção do intérprete para o traçado das feições é condicionada pela resolução, e os elementos morfotectônicos podem representar, desta maneira, a partição da deformação em várias escalas. Através destas características, e ainda com as feições estruturais obtidas com os dados geofísicos, foi então elaborado o mapa litoestrutural, indicado no item 5.4 (ver anexo 6).

A importância destas feições, indicadas em diferentes ordens de grandeza, tem relação direta com os aspectos de migração e convergência de fluídos, bem como para a integridade da seção selante (ver item 5.1.3). Os atributos geométricos e também direcionais, calculados para os lineamentos obtidos com os diferentes sensores, representam desta forma níveis distintos de relação aos parâmetros analisados para o SP I-RB.

Como os modelos pressupõem que estruturas de maior ordem de grandeza são relacionadas a células de fluxo regionais (Rostirolla et al. 2003), as estruturas apontadas como profundas (ou envolvendo o embasamento) e intermediárias (estas últimas em caráter mais restrito), seriam responsáveis por grandes volumes de migração. Esta característica é apontada principalmente para compartimentos regionais, com características aproximadamente prismáticas. São limitadas por grandes estruturas NE e NW como direções principais. Rostirolla et al. (op. cit), apontam como exemplos de limites para estes compartimentos regionais as zonas de falha Lancinha, Guaxupé e Jacutinga (NE) e os lineamentos (de direção NW) Rio Piquirí e Cândido de Abreu (ver figura 2.3). Para a área estudada, além dos lineamentos regionais NE e NW apontados, parecem também exercer influência significativa na compartimentação do arcabouço estrutural feições regionais de direção E-W e NNE. Este aspecto fica bastante claro quando observamos a sobreposição das estruturas obtidas com os sensores geofísicos às isóclinas das formações Rio Bonito e Irati, bem como ao volume migrado de hidrocarbonetos pelo efeito das intrusões ígneas (Figura 6.1). As estruturas de direção E-W, devido a apresentarem pequenos rejeitos verticais associados, podem apresentar um papel de menor importância na migração de hidrocarbonetos. Entretanto estas mesmas estruturas podem ter importância fundamental como destruidoras de acumulações formadas previamente ou como condutos de caráter local.

Nota-se que as estruturas E-W (lineamentos de Taquara Verde e Palmital) estão segmentando diferentes compartimentos, nos dados de isólitais e de volume migrado de hidrocarbonetos (ver figura 6.1). O Lineamento de Cruz Machado, com direção NNE, também aparece como controle regional na segmentação de diferentes domínios nos mapas indicados.

Já as estruturas de menores ordens de grandeza, indicadas principalmente pelos sensores de superfície SRTM90 e Landsat7, podem estar associadas a convergências e/ou barreiras para fluxos. Estas características apresentam, entretanto, caráter localizado. Desta forma através de análises com os mapas de atributos gerados, como mostrado a seguir, pode-se indicar algumas correlações prospectivas regionalmente. Sensores remotos de maiores resoluções (e.g. fotos aéreas) devem ser utilizados para a delimitação mais detalhada de possíveis prospectos, através da geração de mapas de atributos com células de busca de menores dimensões.

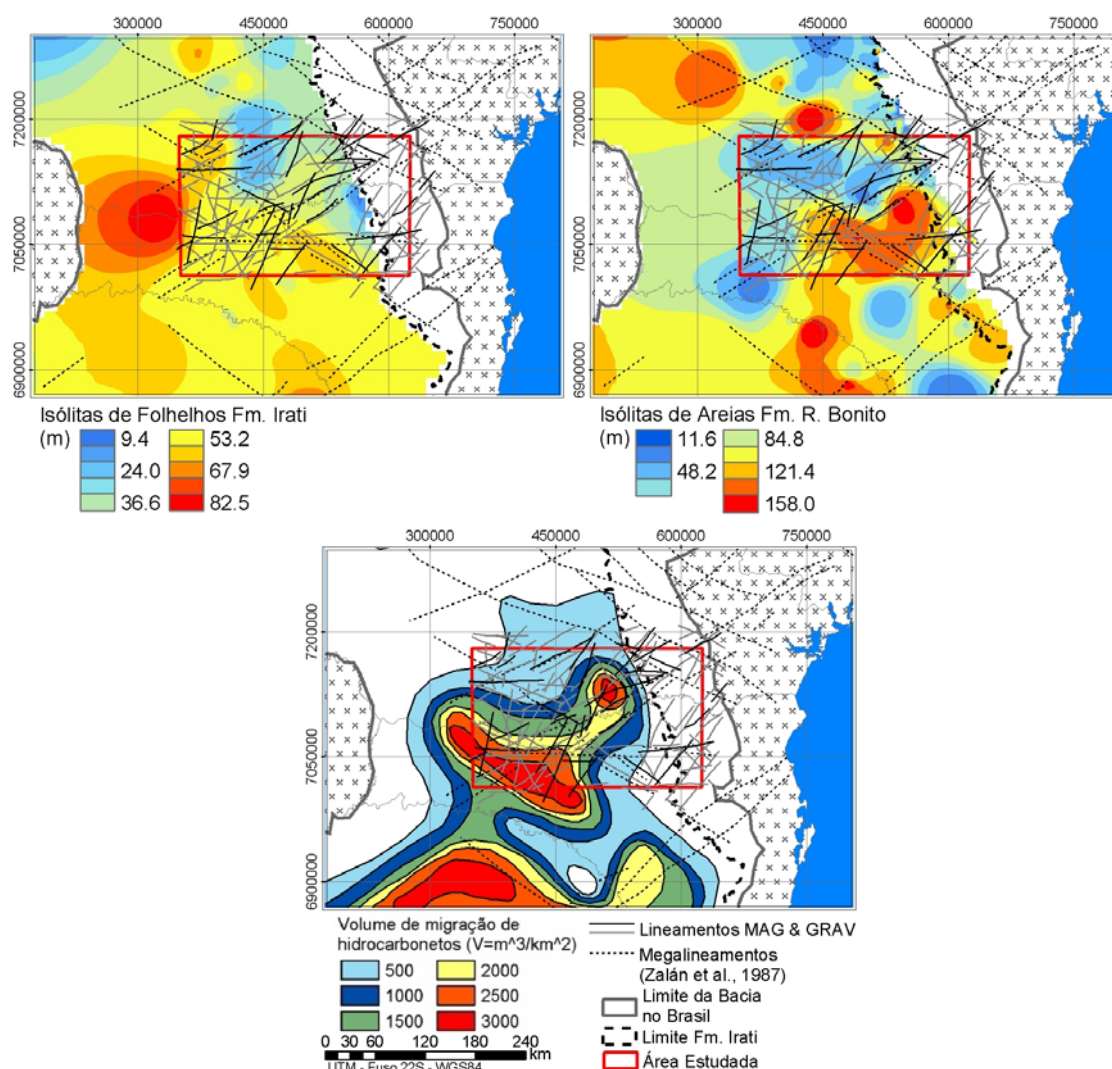


Figura 6.1 – Correlação das estruturas obtidas com dados geofísicos e: isólitais de folhelhos da Fm. Irati (esquerda); isólitais de areia da Fm. Rio Bonito (direita); e volume migrado de hidrocarbonetos (centro – Araújo et al., 2000).

Por intermédio dos mapas de atributos das feições lineares, observa-se para a porção centro-sudoeste da área, locais com características propícias para convergência de fluxo. Zonas de baixa

intensidade de estruturas, coincidentes com altos valores de comprimento médio dos traços responderiam a possíveis alvos prospectivos quando próximos a altos de conectividade e densidade. Migrações laterais, próximas a condutos regionais, podem estar alimentando regiões de maior integridade na área. Os poços pioneiros SC1-TP 0001 SC e 1-TP 0002 SC, localizados nesta região, apresentaram indícios de gás e óleo, corroborando desta forma com o modelo utilizado (Figura 6.2).

Ainda com a investigação de parâmetros de lineamentos, observou-se para as estruturas regionais de direção NW maiores valores de frequência, comprimentos parciais e totais, densidade e intensidade. Já as estruturas de direção NE apresentam em superfície uma resposta de baixos valores para estes parâmetros, porém com comprimento médio de lineamentos maior que aqueles das regiões adjacentes. Estes aspectos podem indicar um maior sucesso prospectivo às estruturas de direção regional NE, principalmente quando referindo-se à característica de maior integridade de selos. Neste caso, blocos adjacentes às falhas de direção NE tenderiam a sofrer alimentação lateral a partir de falhas nesta mesma direção, ocasionando sítios de acumulações com maiores probabilidades de retenção e preservação.

Estruturas geradas contemporaneamente aos momentos críticos do SP I-RB (ver figura 2.5) apresentam importante papel na migração. Devido ao cataclasamento, e conseqüente geração de vazios associados à permeabilidade secundária, estas estruturas definem-se como rotas de migração. Entretanto, através de cimentação posterior estas mesmas estruturas suportariam papel de barreiras aos fluxos de hidrocarbonetos (Aydin, 2000; Magnavita, 2000; Rostirolla et al., 2003). Além da característica indicada, de posterior geração de barreiras a partir de condutos, as falhas mineralizadas podem apresentar características de convergência de fluídos às laterais de suas superfícies. Desta forma os mapas de atributos gerados para os lineamentos (item 5.13 e anexo 5) devem ser analisados de maneira criteriosa, preferencialmente com trabalhos estruturais de detalhe e semi-detálhe associados.

Através de uma análise detalhada no Alto Estrutural de Quatiguá, região onde afloram as formações Irati e Rio Bonito, Rostirolla et al. (2000) observaram dois momentos principais para geração de estruturas trapeadoras. O primeiro evento tem caráter transcorrente compressional, associado à Orogenia La Ventana, e posiciona-se no final do Permiano. Seriam formadas, então, estruturas em flor positivas (Figura 6.3a). O segundo evento indicado pelos autores, de idade cretácea, apresenta comportamento transtensional e afetaria as estruturas inicialmente formadas, promovendo um rearranjo de suas características geométricas originais, configurando armadilhas conforme as indicadas na figura 6.3b. No primeiro caso (ver figura 6.3a), as armadilhas estariam posicionadas de maneira mais centralizada à estrutura. Já naquelas afetadas pelo segundo evento (ver figura 6.3b) os prospectos estariam também posicionados mais afastados da raiz da estrutura.

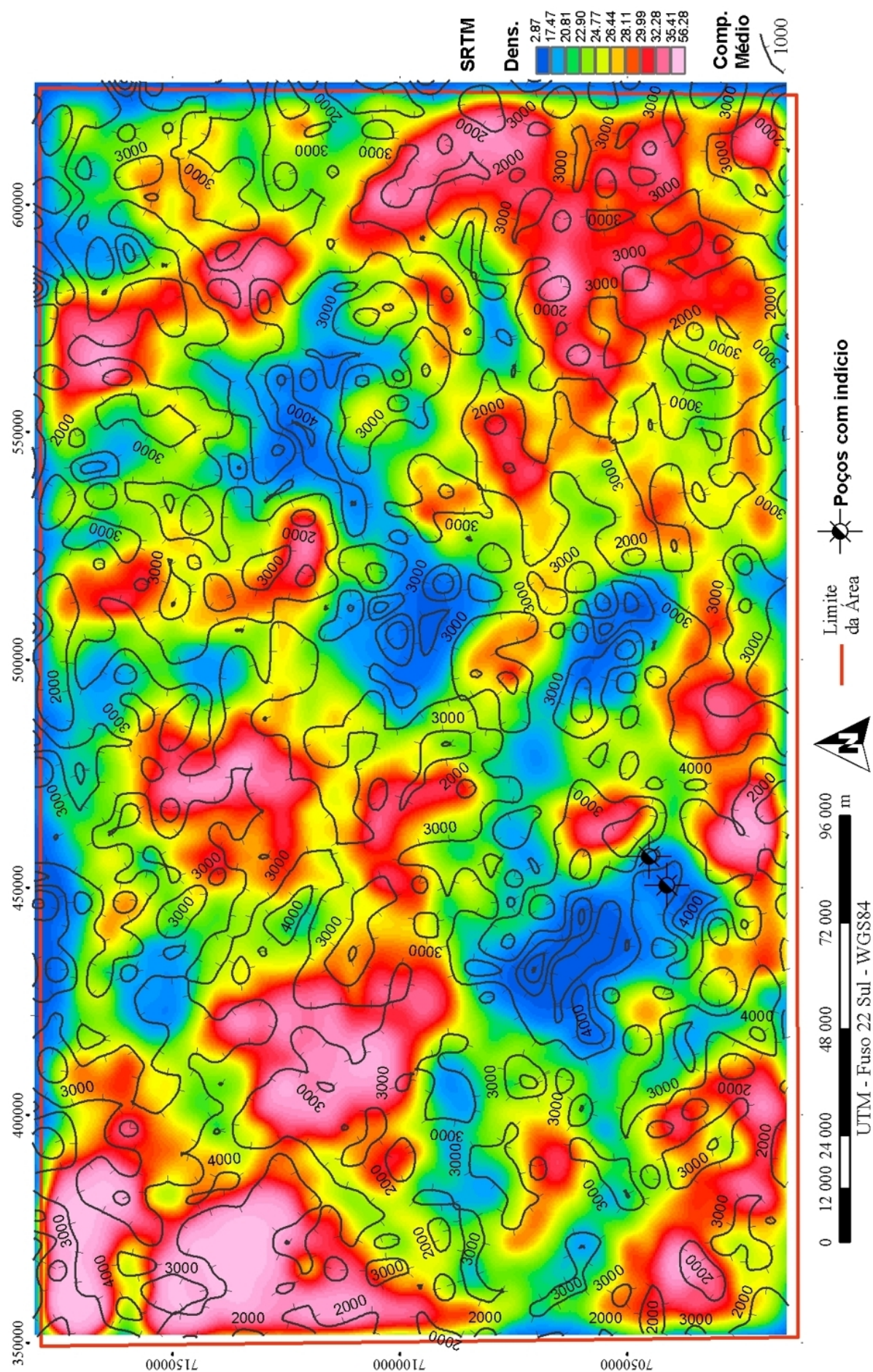


Figura 6.2 – Correlação entre atributos de densidade e comprimento médio de lineamentos. Poços com indício de gás e óleo indicados.

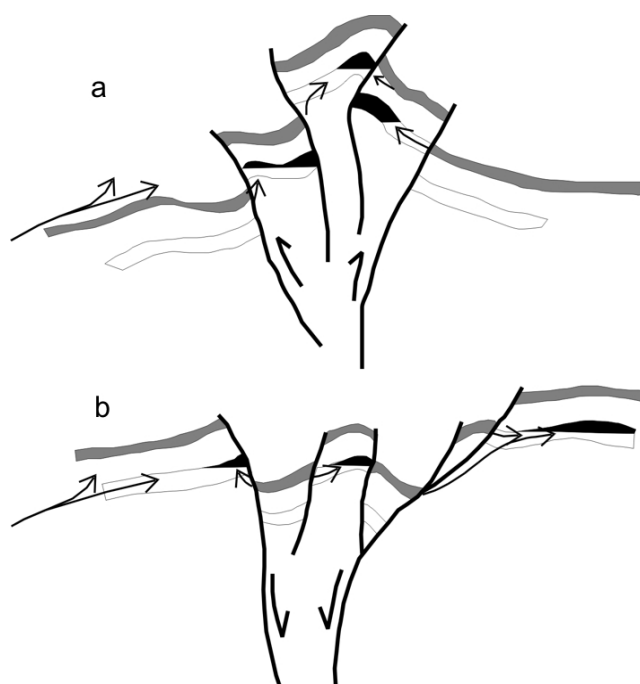


Figura 6.3 – Modelos de formação de armadilhas estruturais para petróleo, concebidos a partir da análise estrutural do Alto de Quatiguá (Rostirolla et al, 2000).

Estruturas em flor positivas, observadas na área de estudo (ver item 5.3.1), têm desta maneira importância fundamental na configuração de armadilhas para hidrocarbonetos. As estruturas observadas no ponto 3-3 (ver figura 5.21a) aparentam configurar uma situação mais semelhante àquela ilustrada na figura 6.3b.

No SP I-RB a migração de fluidos da rocha geradora até o respectivo reservatório, posicionado estratigraficamente abaixo dos folhelhos geradores, em condições normais, ocorre através do aumento na pressão de fluidos no momento da geração. Aspectos relacionados a falhas normais, como indicado no capítulo anterior para diversos pontos de campo, têm então importância direta nas relações de posicionamento estratigráfico lateral entre as formações Irati e Rio Bonito. A migração, nestes casos, seria auxiliada através da condição de lateralização das referidas unidades.

A importância dos rejeitos associadas ao posicionamento lateral destas unidades foi discutida por Strugale (2002). A migração, associada a falhas com grandes rejeitos verticais, teve segundo este autor influência direta na migração secundária ascendente para abastecimento de arenitos das formações Pirambóia e Botucatu (Grupo São Bento). Estas estruturas, associadas ao evento tectônico distensivo do Eocretáceo, apresentariam maiores rejeitos na região próxima ao Arco de Ponta Grossa associadas a falhas de direção NW.

As estruturas N-S apresentariam, conforme os modelos indicados, caráter distensional associado. Falhas normais podem estar associadas a estas estruturas, apresentando as mesmas

características de posicionamento estratigráfico privilegiado com relação à migração lateral de fluidos. O aspecto distensional também poderia estar relacionado a características de ruptura da seção sedimentar superior afetada (inclusive da seção selante), com escape vertical e, desta forma, perda de fluidos associados. A percolação de águas superficiais, através destas estruturas, também poderia afetar eventuais acumulações de hidrocarbonetos por mudanças em suas características físico-químicas.

7 CONCLUSÕES

Os diversos métodos analíticos empregados durante o desenvolvimento deste trabalho evidenciam que os procedimentos de quantificação usados são de importância fundamental na compreensão dos conjuntos de estruturas indicados por estas feições. Através de análises numéricas, os diversos atributos representados através dos lineamentos, podem ser relacionados e compreendidos de forma mais coerente do que apenas através de análises subjetivas. Além das quantificações indicadas, foi possível a obtenção de parâmetros para validação e correlação não somente dos dados, mas também de aspectos referentes aos sensores usados em suas interpretações.

Com a compilação de diferentes métodos de análise, indicados por diversos autores, utilizando desde processos de contagem tradicionais, até técnicas mais refinadas para redução de tendências analíticas, obteve-se grande aporte de informações relacionadas à análise de feições lineares referentes a estruturas geológicas. A integração destas diferentes ferramentas possibilitou a implementação do aplicativo *LinAnalyst* para análise destas estruturas através de técnicas distintas. As análises executadas demonstram potencial efetivo para aplicação dos atributos computados pelo programa a modelos exploratórios.

O aplicativo *Sigmas*, referente ao cálculo e visualização de paleotensões, agiliza sobremaneira este tipo de análise. Os resultados obtidos mostraram que diversas aplicações podem ser executadas com seu uso. Por intermédio deste método pôde-se inferir a presença de mais de uma fase deformacional, além de observar uma possível variação na distribuição de tensões nos locais indicados. O uso do critério de Mohr-Coulomb apresenta resultados bastante significativos para análises em regiões que sofreram uma tectônica recorrente, caso da Bacia do Paraná. Como as tensões são plotadas individualmente (para cada falha), podem-se observar, simultaneamente, informações relacionadas a mais de um evento. Assim, agrupando respostas obtidas de diversas falhas, delimitam-se campos de tensões referentes a episódios tectônicos distintos. Tal característica não se aplica em outros métodos (e.g. método de Angelier ou método de Arthaud), onde a determinação de paleotensões é obtida a partir do agrupamento, *a priori*, de estruturas de um mesmo evento. Esta premissa torna-os não sensíveis a erros na discriminação de estruturas relacionadas ao evento deformacional em foco.

Com a implementação destes aplicativos, além do auxílio às pesquisas aqui elaboradas, pretendeu-se disponibilizar para a comunidade de técnico-científica relacionada, aplicativos livres de simples utilização.

Os dados geofísicos apresentaram importância fundamental na análise das estruturas de 1ª ordem de grandeza. Com sua utilização pode-se, além de ajustar grandes estruturas de cunho regional indicadas por outros autores, observar e detalhar a compartimentação do arcabouço

estrutural em subsuperfície para área estudada. Além da indicação de um modelo com cinco direções principais de estruturas para a área estudada, observaram-se importantes características como a delimitação de baixos gravimétricos, associados a modelos prospectivos na bacia e indicação de uma possível estrutura de direção NNE, de cunho regional, associada à Falha da Lancinha. As feições de geometria sigmoidal, indicadas para a região central da área estudada, devem ser estudadas de maneira mais detalhada para melhor compreensão de seu significado geológico-estrutural.

Através das diversas análises, tanto direcionais como de atributos, executadas para os dados de superfície, observam-se várias particularidades para os conjuntos de dados indicados. Talvez a característica mais notável seja aquela de rotação das classes direcionais observadas através dos diagramas de rosetas elaborados para o sensor Landsat7. A influência da insolação NE destacou sobremaneira as feições de direção NW. Esta característica também foi observada através do diagrama para média de comprimentos (ver figura 5.14). Mesmo com as técnicas de filtragens direcionais indicadas, esta característica não pode ser suficientemente minimizada. Desta forma ficou claro que o MDE SRTM90, com possibilidade de pseudo-iluminação a partir de diversos azimutes, comporta a característica de apresentar redução quanto a tendências direcionais. Esta característica é, entretanto, limitada à escala, e como indicado no decorrer deste trabalho, o sensor Landsat7 apresenta possibilidade de observação de estruturas de menores ordens de grandeza. Estruturas indicadas neste trabalho como de terceira ordem foram detectadas apenas com o uso das imagens Landsat7. Contudo para a escala de trabalho aqui adotada, de 1:500.000, o MDE SRTM apresenta excelentes respostas no mapeamento de estruturas.

A relação entre estruturas observadas para o embasamento e superfície apresenta uma clara diferença quanto às falhas de direção N-S. Estas ocorrem de maneira bastante significativa nas porções superficiais, porém não há indicações de ocorrências para as porções mais basais da bacia, como apontado nos mapas geofísicos usados. A possibilidade de um arqueamento progressivo a partir do início do Cenozóico, de caráter regional, poderia ter gerado estruturas com características de pouca continuidade vertical, porém com grandes reflexos em mapa, através de esforços distensivos, como apontado no final do capítulo 5. Esta hipótese necessita, porém, de maiores investigações e apreciações mais detalhadas.

Ainda com relação à grande presença de estruturas de direção N-S nas faixas aflorantes de rochas Neopermianas, podem ser relacionadas a fraturas do tipo “T” de Riedel, associadas a esforços subhorizontais de direção também aproximadamente N-S, vinculadas à Orogenia La Ventana.

Com relação ao Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, através da interpretação e integração dos diversos resultados obtidos, foram observadas importantes relações nas suas características de reservatório com os dados estruturais estudados:

- A porção centro-sudoeste da área estudada apresenta a interseção de três estruturas de caráter regional (Lancinha – NE, Caçador – NW e Taquara Verde – E-W). Estruturas de maior complexidade podem estar associadas a este conjunto, desta forma aumentando a probabilidade de ocorrência de trapas estruturais.
- Estruturas de subsuperfície (intermediárias e envolvendo o embasamento) e correspondentes zonas de falhas superficiais apresentam comportamento direcional por vezes divergente. As estruturas de maior ordem podem estar afetando células de fluxo regionais, enquanto estruturas de menor ordem estariam relacionadas a barreiras e/ou convergência de fluidos em unidades de fluxo locais.
- As estruturas regionais de direção NE apresentam, para os lineamentos de superfície, respostas associadas a menores frequências, comprimentos parciais e totais, densidade e intensidade, quando comparadas às estruturas de direção NW. Estas relações podem indicar uma maior integridade das trapas associadas a estas zonas de falha de direção NE.
- As estruturas traçadas a partir dos sensores Landsat7 e SRTM demonstram divergências observadas através dos mapas de atributos gerados, e também distintas dimensões fractais. Estas incompatibilidades podem estar associadas às diferentes ordens de grandeza representadas pelos lineamentos interpretados com os dois sensores.
- Através dos mapas de atributos das feições lineares, observa-se na porção centro-sudoeste da área regiões com características propícias para convergência de fluxo. Zonas de baixa intensidade de estruturas, coincidentes com altos valores de comprimento médio dos traços responderiam a possíveis alvos prospectivos quando próximos a altos de conectividade e densidade. As migrações laterais, próximas a condutos regionais, podem estar alimentando regiões de maior integridade na área. Os poços pioneiros 1-TP 0001 SC e 1-TP 0002 SC, localizados nesta região, apresentaram indícios de gás e óleo, corroborando, desta forma, com o modelo utilizado.
- Caso realmente geradas a partir do arqueamento regional indicado, ou outro tipos de esforços distensivos, as falhas de direção N-S podem estar associadas a escapes de hidrocarbonetos por condutos verticais gerados em suas formações, bem como fraturamento da seção selante e destruição de acumulações supostamente formadas em período anterior.

-
- Em bacias carentes de levantamentos sísmicos, estudos de feições estruturais a partir de métodos alternativos aos tradicionalmente utilizados pela indústria do petróleo, como os indicados neste trabalho, são de fundamental valia no auxílio à compreensão da evolução e caracterização de estilos estruturais associados.
 - Feições estruturais associadas a rejeitos verticais apresentam características essenciais no auxílio à migração lateral de fluídos através da lateralização das formações Rio Bonito e Irati. Mapeamentos estruturais de detalhe devem ser executados para detecção destas estruturas.
 - Estudos de detalhe também devem ser executados para localização de estruturas em flor. Trapas estruturais devem estar associadas preferencialmente a estas estruturas, como indicado no capítulo anterior. A recente descoberta de uma ocorrência de óleo na região de Joaquim Távora, próximo ao Alto Estrutural de Quatiguá, região onde Rostirolla et al. (2000) descreveram estruturas acumuladoras de óleo, pode comprovar o potencial destas feições como principais trapeadoras da bacia.

REFERÊNCIAS

- AGTERBERG, F. P.; CHENG, Q.; BROWN, A.; GOOD, D. **Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet Batholith, Manitoba**. *Computers & Geosciences* Vol. 22, No. 5, pp. 497-507, 1996.
- AKHIR, J. M.; ABDULLAH, I; **Geological applications of LANDSAT thematic mapper imagery: mapping and analysis of lineaments in NW Peninsula Malaysia**; ACRS - Asian Conference on Remote Sensing. Proceedings, 1997.
- ARAÚJO, L.M.; TRIGÜIS, J.A.; CERQUEIRA, J.R.; FREITAS, L.C. da S. **The atypical Permian petroleum System fo the Paraná Basin, Brazil**, in MELLO, M.R.; KATZ, B.J. *Petroleum systems of South Atlantic margins: AAPG Memoir 73*, p. 377-402. 2000.
- ARFKEN, G. **Mathematical Methods for Physicists**, 3 ed. Orlando, FL: Academic Press, 1985.
- ARTUR, P.C. **Paleolineamentos na Bacia do Paraná: Favorabilidade para acumulação de petróleo**. Curitiba. Dissertação de Mestrado – UFPR. 1998.
- ARTUR, P.C.; SOARES P.C. **Paleoestruturas e Petróleo na Bacia do Paraná, Brasil**. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4), p. 433-448, 2002.
- AYDIN, A. **Fractures, faults and hydrocarbon entrapment, migration and flow**. *Marine and Petroleum Geology*, n. 17, p.797-814, 2000.
- AYDIN, A.; NUR, A. The types and role of stepovers in strike-slip tectonics. In: K. Biddle, Christie-Blick, N. **Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation**, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 37, p. 35-44, 1985.
- BAILEY, M.; CLARK, D. **Using ChromaDepth to Obtain Inexpensive Single-image Stereovision for Scientific Visualization**. *Journal of Graphics Tools*, 3(3):1-9, 1998.
- BALENA, F. **Programming Microsoft Visual Basic 6.0 – Ebook Edition**. Redmond, Washington: Microsoft Press, 1999.
- BARBOSA, R. M.; **Geometria analítica com introdução simultânea à programação linear**, LPM EDITORA, São Paulo, 1965, 193 p.
- BARTOSZECK. M.K. **Análise de dados georreferenciados para prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná**, in: *Anais do 8º EVINCI*, Curitiba, p. 213. 2000.
- BELFIELD, W.C., **Multifractal characteristics of natural fracture apertures**. *Geophysical Research Letters*, v.21, n.24, p. 2641-2644, 1994.

- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Editora da UFSC, Florianópolis, v. 1, 425 p., 1994.
- BIZZI, L.A. *et al.* **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas**. SIG e mapas na escala 1:2.500.000. Brasília: CPRM. 4 CD-Rom, 2001.
- BOLTON, J. NASA Remote Sensing Tutorial Web Page. Disponível em: <<http://rst.gsfc.nasa.gov/>>, acessado em 06 set. 2004.
- BONHAM-CARTER, G. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**, Pergamon Press Inc., 414 p., 1995.
- CONNELL, J. **Beginning Visual Basic 6 Database Programming**. Canadá: Wrox Press Ltd, 861 p., 2001.
- COXETER, H. S. M. **Introduction to Geometry**, 2 ed. New York: Wiley, 1969.
- DE FREITAS, R.C.; ROSTIROLLA, Análise comparativa entre estruturas do embasamento e respostas em superfície na Bacia do Paraná, região entre os estados do Paraná e Santa Catarina. In: V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - SNET, 2005. **Boletim de Resumos Expandidos**. Curitiba. p. 41-44, 2005.
- DE FREITAS, R.C.; ROSTIROLLA, S.P.; DE FREITAS, D.C. Desenvolvimento de um aplicativo para determinação de paleotensões pelo critério de Mohr-Coulomb.. In: V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - SNET, 2005. **Boletim de Resumos Expandidos**. Curitiba. p. 517-520, 2005.
- DE FREITAS, R.C.; ROSTIROLLA, S.P.; MANCINI, F. Auxílio computacional na análise de lineamentos obtidos por sensores remotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42, 2004, Araxá. **Anais...** Araxá: SBG, 2004, CD-ROM.
- DEMAISON, G.; HUIZINGA, B.J. **Genetic classification of petroleum systems**. AAPG Bulletin, v.75, n.10, p.1626-1643, 1991.
- DNPM/SC - Ministério das Minas e Energia. **Mapa geológico do Estado de Santa Catarina – 1:500.000**. Florianópolis, 1986.
- ESRI. **Using ArcGIS Spatial Analyst**. ArcPress, EUA, 232 p., 2002.
- FERREIRA, F.J.F. **Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: Configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa**. São Paulo. Dissertação de Mestrado – USP. 1982.
- FITZGIBBON A.; PILU M.; FISHER, R.B. **Direct Least square fitting of ellipses** Pattern Analysis And Machine Intelligence, vol. 21, n. 5, p. 476-480, 1999.

- FLORENZANO, T. G.; TAVARES JR., S. S.; LORENA, R. B.; MELO D. B. **Multiplicação e Adição de Imagens Landsat no Realce de Feições da Paisagem**. X SBSR, Anais, Foz do Iguaçu, p. 1257-1263, abr. 2001.
- GEOSOFTE **Microlevelling using Bi-directional Gridding**. Geosoft Technical Note, Geosoft Inc., 4p, 2001.
- GUPTA, R.P. **Remote sensing geology**. Berlim: Springer-Verlag. 356 p. 1991.
- HIPPERTT, J. **Are S-C structures, duplexes and conjugate shear zones different manifestations of the same scale-invariant phenomenon?** Journal of Structural Geology, 21, p. 975-984, 1999.
- HIRATA, T. **Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales**. Pure and Applied Geophysics, 1989; 131:157-70.
- GILLESPIE, P.A.; HOWARD, C.B.; WALSH, J.J.; WATTERSON, J. **Measurement and characterization of spatial distributions of fractures**. Tectonophysics, 226, 113-141, 1993.
- GUARNIERI, P. **Regional strain derived from fractal analysis applied to strike-slip fault systems in NW Sicily**. Chaos, Solitons and Fractals, 14, 2002. 71-76.
- INPE. **Utilizando o Spring**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/entrada.htm>> Acesso em: 10 fev. 2004.
- JENSON, S.K.; DOMINGUE, J.O. **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600, 1988.
- KOCALA, A.; DUZGUNB, H. S.; KARPUZA, C. **Discontinuity Mapping With Automatic Lineament Extraction from High Resolution Satellite Imagery**. XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, 12-23 jul. 2004 Istambul, Turquia, 2004.
- LANDIM, P. M. B.; **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora da UNESP, p. 111-122, 1997.
- LUIZ, J. G.; COSTA E SILVA; L. M. **Geofísica de prospecção**. Editora Universitária UFPA – Editora Cejup, v. 1. 1995.
- MACEDO, J. M. **Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes**. Boletim de Geociências da Petrobrás, 3 (3), p. 159-173, 1989.

- MACLENNAN, M.; FOTHERINGHAM, A.S.; BATTY, M. **Fractal geometry and spatial phenomena: A Bibliography**. Technical Report, NCGIA, Department of Geography, State University at Buffalo, 1991.
- MADANI, A. A.; **Selection of the optimum LANDSAT TM bands for automatic lineaments extraction, Wadi Natash área, South Eastern Desert, Egypt**. ACRS - Asian Conference on Remote Sensing. Proceedings, 2001.
- MAGNAVITA, L.P. **Deformation mechanisms in porous sandstones: Implications for development of fault seals and migration paths in the Recôncavo Basin, Brazil**. Petroleum Systems of South Atlantic Margins: AAPG Memoir 73, p. 195-212, 2000.
- MAGNAVITA, L.P.; SOUZA, M.S. **Caracterização de sistemas de fratura através de análise multifractal**. V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Gramado, p.414-415, 1995.
- MAGOON, L.B; DOW, W.G. **The petroleum system**. AAPG Memoir 60, 1994.
- MANDELBROT, B.B. **How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension**. Science, v.156, p. 636-638, 1967.
- MARTIN, J., ODELL, J.J. **Análise e projeto orientados a objeto**. São Paulo: Makron Books, 639p., 1995.
- MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. **Bacia do Paraná**. *Bol. Geoc. Petrobrás*, Petrobrás, 8(1):69-82. 1994.
- MILANI, E.J.; KINOSHITA, E.M.; ARAÚJO, L.M. DE; CUNHA, P.R. DA C. **Bacia do Paraná: possibilidades petrolíferas da calha central**. *Bol. Geoc. Petrobrás*, 4(1):21-34, 1990.
- MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A. **Sedimentary basins of South America**. In: U.G. Cordani; E.J. Milani; A. Thomaz Filho; D.A. Campos. *Tectonic Evolution of South America*, Edição Especial do 31st International Geological Congress, p. 389-449. 2000.
- MINEROPAR; DNPM. **Mapa Geológico do Estado do Paraná – 1:650.000**. Curitiba, 1989.
- MINTY B.R.S. **Simple micro-levelling for aeromagnetic data**. *Exploration Geophysics*, v. 22, p. 591-592, 1991.
- NORTHFLEET, A. A.; BETTINI, C.; CHAVES H. A. F.; **Aplicação de geomatemática à prospecção de petróleo: análise de fraturas por polinômios ortogonais**. in: *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia*, SP, v.2 , p. 61-70, 1971.
- NOVAK, I. D. AND SOULAKELLIS, N. **Identifying geomorphic features using Landsat-5/TM Data Processing Techniques on Esvos, Greece**. *Geomorphology*, 34(7), pp. 101-109, 2000.

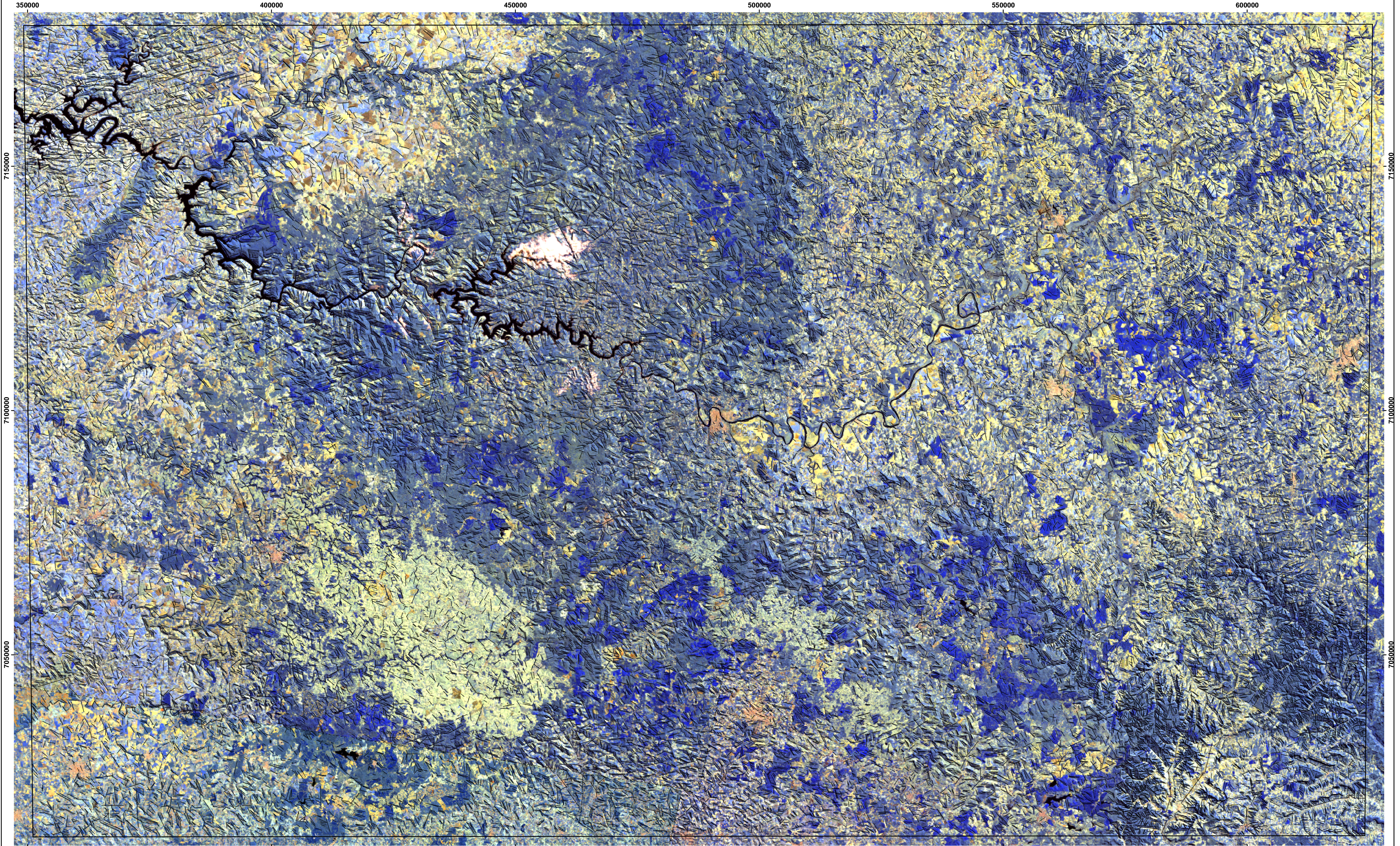
- O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. **Lineament, linear lineation some proposed new standards for old terms**. Geological Society America Bulletin 87, p. 1463-1469, 1976.
- OLIVEIRA, M. J. R. **Análise do comportamento da Zona de Falha Cubatão-Lancinha na Bacia do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 144 p. 1991.
- PAULIPETRO **Relatório de Atividades 1979/1981**, 59 p, 1981.
- PCI **Geomatica User's Manual**. PCI Press, EUA, 2003.
- PETRI, S.; FÚLFARO, V.J. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Editora da USP. 631 p. 1983.
- PORTELA FILHO, C.V. **Caracterização geofísico-estrutural da região Londrina - Maringá (PR) e suas implicações para a exploração de águas subterrâneas**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2003.
- PRICE, N.J.; COSGROVE, J.W. **Analysis of geological structures**, Cambridge: Univ. Press, 1990.
- QUEIROZ, C. L.; MENESES P. R.; JOST H.; **Lineamentos em imagens de sensores remotos e seu significado estrutural nos terrenos granito-greenstone belt de Orixás (GO)**. Revista Brasileira de Geociências, 30(4), p 655-662, 2000.
- QUINTAS, M. C. L. **O embasamento da Bacia do Paraná: reconstrução geofísica do seu arcabouço**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1995.
- RAGAN, D.M. **Structural geology: an introduction to geometrical techniques**, 3 ed. Malloy Lithographing, 1985.
- RAMIREZ, E.; **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>, Acesso em: 10 jun. 2004.
- RIBEIRO Jr., P. J.; DIGGLE, P. J. **The geoR package**. Version 1.3-14, Set. 2003, Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/geoR>>. Acesso em: 09 set. 2003.
- RIBEIRO Jr., P. J. **Análise geoestatística tradicional**, tutorial para o pacote geoR. Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/MBG/tutorials/trad.R>> Acesso em: 09 set. 2003a.
- RIBEIRO Jr., P. J. **Model based geostatistics**, (Course Slides). Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/MBG/slides/slides.pdf>> Acesso em: 09 set. 2003b.
- RICCOMINI C. **Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-Gondwânicos da porção centro-oriental do estado de São Paulo e áreas vizinhas**. Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, 100 p, 1995.

- ROCKWARE. **RockWorks 2004 Help**. Versão digital, acompanha o pacote computacional, RockWare Support, 2004.
- ROHRBAUGHT Jr., M. B.; DUNNE, W. M.; MAULDON, M.; **Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows**. in: AAPG Bulletin, v. 86, n. 12, December 2002, p. 2089-2104.
- ROSTIROLLA, S.P.; MANCINI, F.; RIGOTI, A. **Reativação de Megalineamentos na Evolução Fanerozóica da Placa Sul-Americana**. In: X SNET, Curitiba, Resumo expandido submetido e aceito, 2005.
- ROSTIROLLA, S.P.; APPI, C.J.; VESELY, F.F.; TRZASKOS-LIPSKI, B.; MANCINI, F.; KRAFT, R. **Análise preliminar de rotas de migração de gás no Sistema Petrolífero Ponta Grossa – Itararé (!), Bacia do Paraná**. In: IX SNET - Búzios, Boletim de Resumos, p. 358-360, 2003.
- ROSTIROLLA, S.P.; ASSINE, M.L.; FERNANDES, L.A.; ARTUR, P.C. **Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná - o exemplo do Alto Estrutural de Quatiguá**. Revista Brasileira de Geociências, v. 30, p. 639-648, 2000.
- ROSTIROLLA, S.P.; SOARES, P.C.; CHANG, H.K. **Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Recôncavo Basin and Ribeira Belt, Brazil**. Nonrenewable Resources, v. 7, n. 1, p. 7-24. 1998.
- ROWLINGSON, B.; SHIMAKURA, S.; RIBEIRO Jr, P. J. **Introdução ao R, version 1.6.1**. Disponível em: <<http://www.est.ufpr.br/Rtutorial>> Acesso em: 02 set. 2003.
- SCHLUMBERGER **Schlumberger oilfield glossary**. Disponível em: <<http://www.glossary.oilfield.slb.com>> Acesso em: 12 mar. 2004.
- SOARES, P.C. **Tectônica sin-sedimentar cíclica na Bacia do Paraná: controles**. Curitiba. Tese de Titular – UFPR, 148 p. 1991.
- SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M. **Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná**. São Paulo: Relatório RT-342/82, Paulipetro. Consórcio CESP/IPT. 1982.
- STEENBLIK, R. **The chromostereoscopic process: a novel single image stereoscopic process**. Proceedings of SPIE: True 3D Imaging Techniques and Display Technologies, Jan. 1987.

- STRUGALE, M. **Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico): Implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná.** Curso de Pós-Graduação em Geologia, UFPR, Dissertação de Mestrado, Curitiba, 124 p, 2002.
- TANKARD, A.J.; ULIANA, M.A.; WELSINK, H.J.; RAMOS, V.A.; TURIC, M.; FRANÇA, A.B.; MILANI, E.J.; BRITO NEVES, B.B.; EYLES, N.; SANTA ANA, H.; WIENS, F.; CIRBIAN, M. LÓPEZ PAULSEN, O.; GERMS, G.J.B.; DE WIT, M.J.; MACHACHA, T.; MILLER, R.M. **Tectonic controls of basin evolution in southwestern Gondwana.** AAPG memoir 62, p. 5-52. 1996.
- TCHALENKO, J.S., **Similarities between shear zones of different magnitudes.** Geological Soc. Americ. Bull., 81, pp. 1625-1640, 1970.
- TRZASKOS-LIPSKI, B.; ROSTIROLLA, S. P.; FIGUEIRA, I. F.R.; APPI, C. J. **Aspectos da Tectônica Rúptil das rochas do Grupo Itararé.** In: Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa. pg. 627, . 2002.
- TSOUTRELIS, C.; EXADACTYLOS, G. E.; KAPENIS, A. P. **Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis.** Proc. from Symp. In: Mechanics of Jointed and Faulted Rock, p. 103-112, 1990.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Digital Elevation Models: **U.S. Geological Survey Data User's Guide 5**, 38 p, 1987.
- USGS; EROS Data Center; Data Services Branch. **Seamless Data Distribution System.** Disponível em: <<http://seamless.usgs.gov/>> Acesso em: 12 jan. 2004
- VOLLAND, S.; KRUHL, J.H. **Anisotropy quantification: The application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW Sardinia.** Journal of Structural Geology 26, p.1499-1510, 2004.
- WILCOX, R.E.; HARDING, T.P.; Seely, D.R. **Basic Wrench Tectonics.** AAPG Bulletin, v. 57; n. 1, p. 74-96, 1973.
- WILLIAMS, D.; **Landsat 7 science data users handbook.** Disponível em: <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html>, acessado em: 20 ago. 2004.
- WOLFRAM RESEARCH, INC **Mathworld.** Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/>> Acesso em: 10 mai. 2004.
- WOODCOCK, N.H.; SCHUBERT, C. Continental strike-slip tectonics, in: HANCOCK, P.L. **Continental deformation.** Oxford, Pergamon Press, p. 251-263, 421 p., 1994.

- ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; APPI, V.T.; NETO, E.V.S.; CERQUEIRA, J.R.; MARQUES, A. **The Paraná Basin, Brazil**. Tulsa: AAPG Memoir 51, p. 681-708. 1990.
- ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. **Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná**. Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Curitiba. V. 1, p. 441-473. 1987.

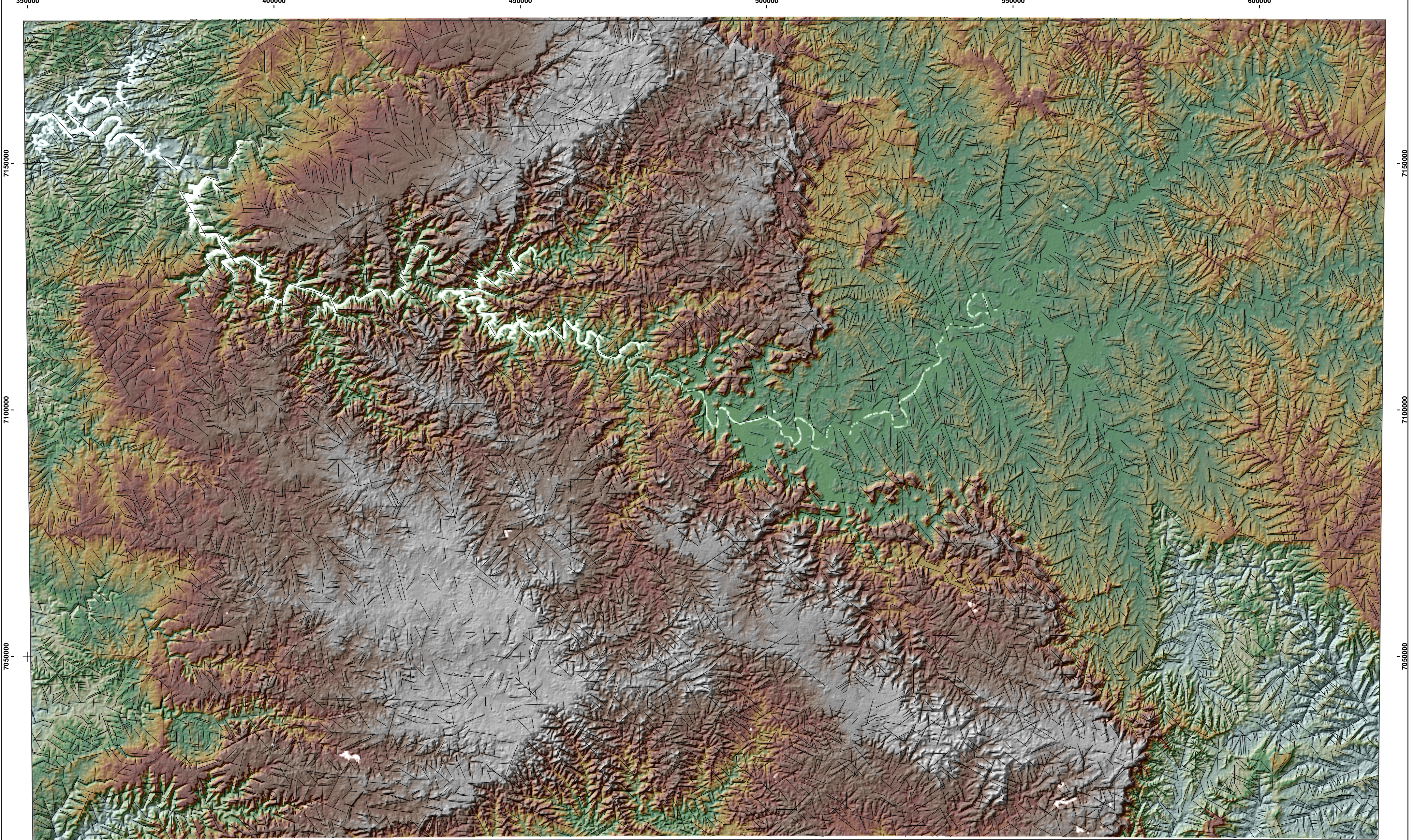
Lineamentos obtidos com LANDSAT7 ETM+



350000 400000 450000 500000 550000 600000

Composição RGB Bandas 8; 5; 4

Lineamentos obtidos com MDE SRTM90



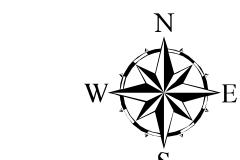
350000 400000 450000 500000 550000 600000

MDE SRTM90 (Falsa iluminação NW + Hipsométrico)

Altitude

275 - 542
542 - 652
652 - 742
742 - 815
815 - 880
880 - 955
955 - 1 034
1 034 - 1 114
1 114 - 1 203
1 203 - 1 445

ESCALA: 1 : 500. 000



Área estudada

Lineamentos Traçados



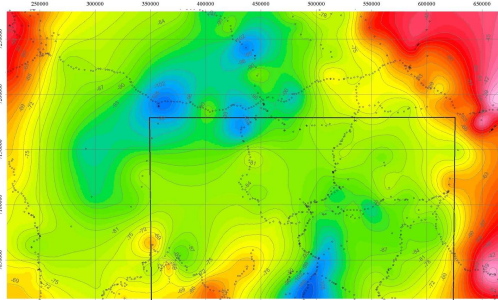
Projeção UTM - Fuso 22 Sul - WGS 1984

ANEXO 1 - Lineamentos Traçados

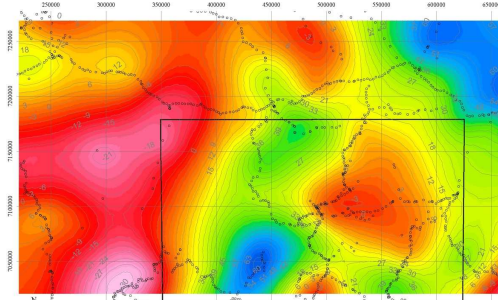


ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS

MAPA BOUGUER



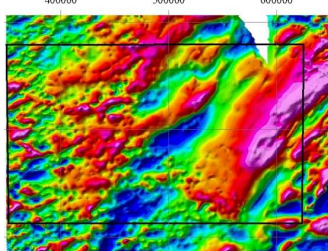
MAPA FREE-AIR



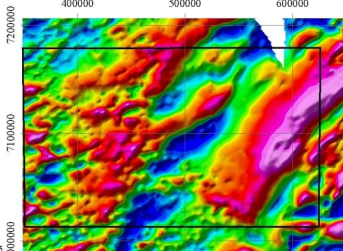
Estações gravimétricas compiladas por Quintas, M. C. L.

ANOMALIAS MAGNÉTICAS

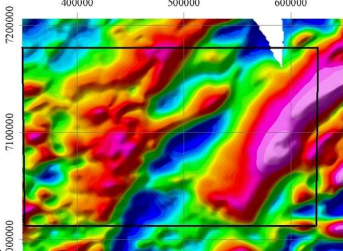
UPWARD 1000 m
MAG Residual



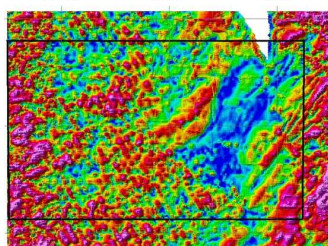
UPWARD 2000 m
MAG Residual



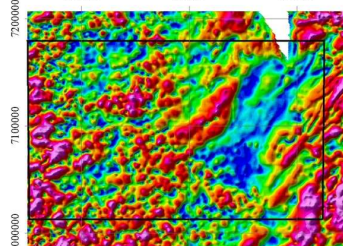
UPWARD 5000 m
MAG Residual



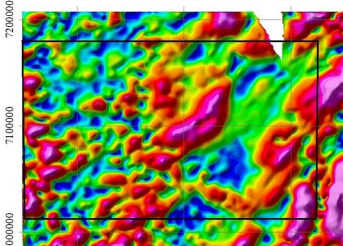
Sinal Analítico



Sinal Analítico



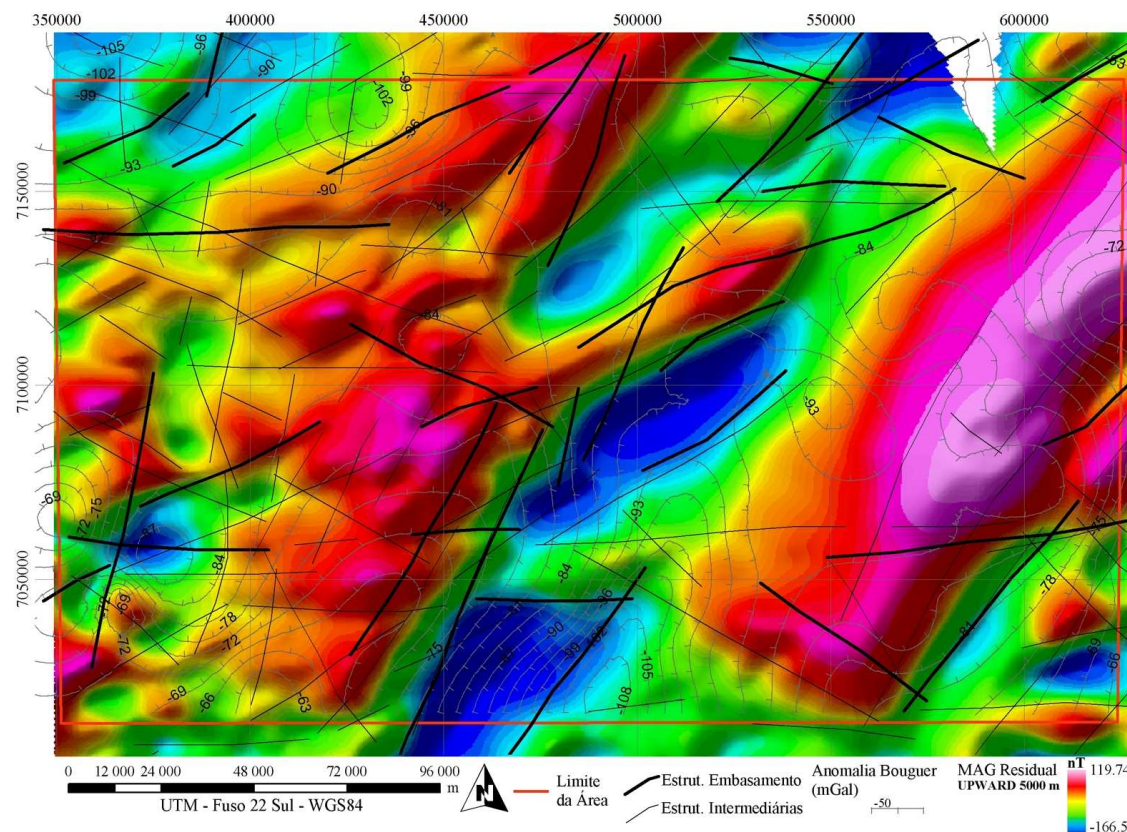
Sinal Analítico



UTM - Fuso 22 Sul - WGS84

Compilação dos levantamentos aeromagnéticos:
- Bacia do Paraná 1973;
- Bacia do Paraná - Cuiabá (Aerom 1);
- Rio Iguaçu - Cuiabá (Aerom 1);
- Serra da Mesa Sul.

ESTRUTURAS DE SUBSUPERFÍCIE



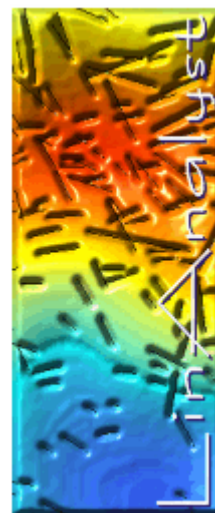
LinAnalyst v. 1.0.0

MANUAL DO APLICATIVO

Auxílio na Análise de Lineamentos.
Programa desenvolvido durante a
dissertação de mestrado intitulada:

Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero
Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná.

Rafael Correia de Freitas



* Esta é a primeira versão do programa. Portanto deve conter uma quantidade grande de *bugs*. Caso, durante a utilização, você note algum problema, ou tenha uma sugestão, favor entrar em contato com:
rcdfreitas@click21.com.br

1) Dados de entrada:

O aplicativo utiliza como dados de entrada os pares de coordenadas X e Y dos extremos de cada lineamento, em arquivos do tipo Dbase (*.dbf). Os dados devem estar no formato de uma matriz de 4 colunas por n linhas (n representa o número de lineamentos), como ilustrado abaixo:

x_1	y_1	x_2	y_2
496655	7089189	496996	7089359
496360	7106365	495673	7106407
495724	7097942	499380	7101120
497473	7110816	497437	7110849
...
n	n	n	n

O programa apresenta limitação de trabalhar com bancos de dados de até 100.000 lineamentos.

Para gerar este tipo de tabela a partir dos dados vetoriais (traçados de lineamentos) foram criados dois programas auxiliares. Caso você disponha do programa ArcMap (versão 8.0 ou superior), para a detecção das coordenadas dos extremos dos lineamentos pode ser utilizado um *script* elaborado em VBA para esta finalidade. O *script* encontra-se junto aos arquivos contidos no pacote, e sua utilização está descrita a seguir:

1.1) Obtenção das coordenadas X e Y dos extremos dos lineamentos a partir de um *script* para ArcMap:

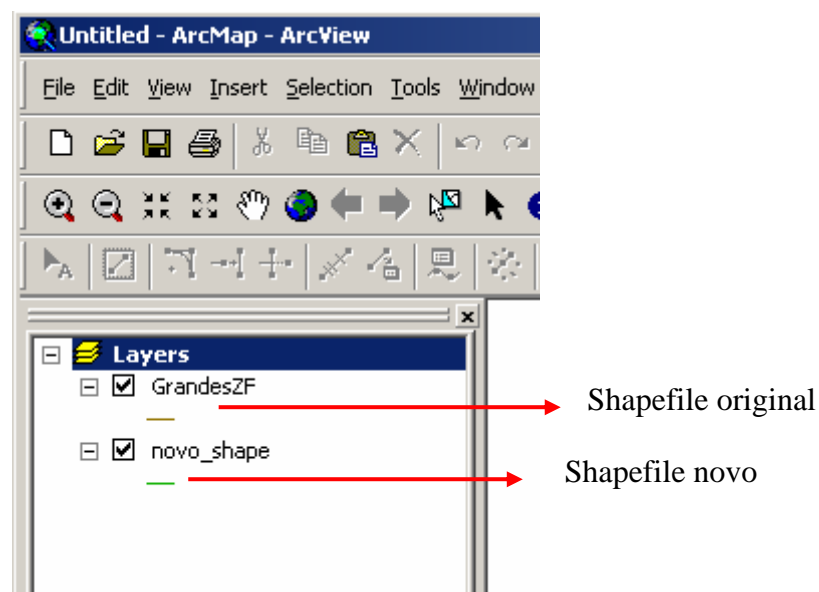
1. No programa ArcMap abra o editor VBA (**Tool** → **Macros** → **Visual Basic Editor**)
2. Abra o arquivo XYcoord.txt com algum editor de texto, copie todo o conteúdo e cole no editor VBA.
3. Salve e feche o editor VBA.
4. Para gerar o botão que acionará o *script* no ArcMap adicione um botão da seguinte forma: **Tools** → **Customize** – depois → **Commands**, em Categories: selecione **UIControls** → **New UIControl...** → **UIButtonControl** – O nome deste botão deverá

ser `UIButtonControl1_Click()` - conforme nome no *script* - Depois de criado o botão, arraste-o com o mouse até alguma barra de ferramenta do ArcMap.

Agora, para obter as coordenadas, você deve selecionar o layer (polilinhas) que deseja e clicar no botão criado. As coordenadas serão inseridas na tabela dbf associada ao shapefile. (obs: o arquivo vetorial do qual serão obtidas as coordenadas deve ser, neste caso, necessariamente um shapfile).

Note que as coordenadas obtidas são referentes aos extremos de cada polilinha. Caso a polilinha seja composta por vários segmentos, os vértices internos serão descartados. Para utilizar todos os vértices da polilinha, outro *script* está disponível. Para instalar este segundo *script* o procedimento é o mesmo dos passos 1 a 4, indicados acima. O nome do arquivo com o *script* é `Split_at_Vertex.txt`, e o nome do botão está indicado na rotina como `UIButtonControl2_Click()`.

Para utilizar este *script* é necessário criar um novo shapefile e posicioná-lo, nos layers, logo abaixo do shapefile que se deseja segmentar, como indicado abaixo.



Então seleciona-se o shapefile original e clica-se sobre o novo botão criado. O shapefile posicionado abaixo conterá os mesmos lineamentos do original, porém somente com segmentos individuais.

Agora pode-se obter as coordenadas para todos os segmentos usando o primeiro *script* indicados (XYcoord).

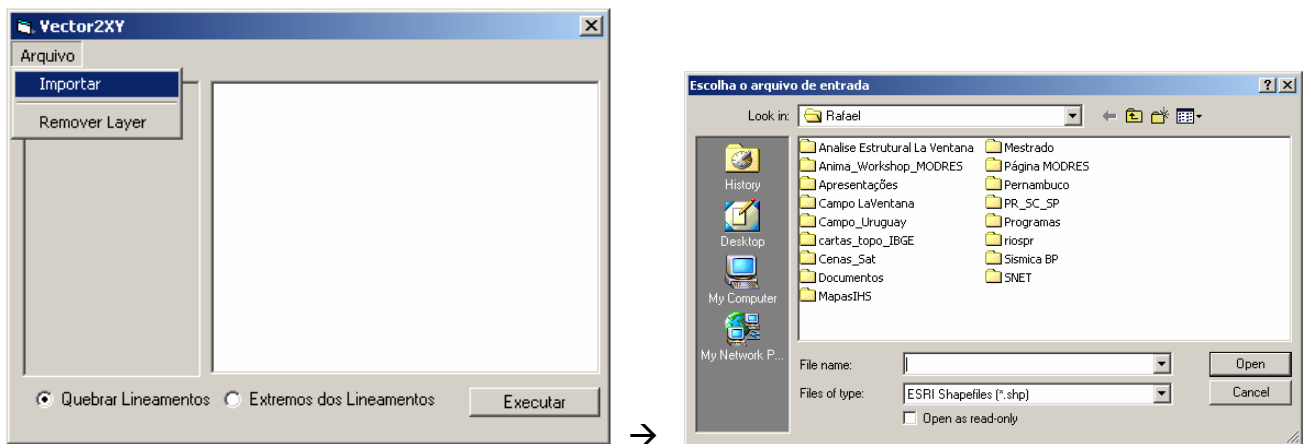
1.2) Obtenção das coordenadas X e Y dos extremos dos lineamentos com o programa Vector2XY.

O programa Vector2XY utiliza bibliotecas de rotinas do pacote MapObjects (ESRI). Desta forma, como não disponho de uma licença válida deste pacote, o programa compilado apresenta um prazo de validade até 07 de agosto de 2005. O código fonte está em anexo (projeto do Visual Basic). Caso o usuário disponha de uma licença da referida biblioteca MapObjects, poderá compilar uma versão permanente. Uma versão demonstrativa da

biblioteca ArcObjects (Atualmente na versão 2.3 – com validade de 3 meses) pode ser obtida gratuitamente no sítio da ESRI (esri.com).

As conversões com o aplicativo Vector2XY pode obter as coordenadas dos extremos de vetores nos formatos DXF(AutoCAD) e SHP (ESRI). Para conversão:

1. **Arquivo → Importar** (seleciona-se então o arquivo vetorial – DXF ou SHP)



2. Após a seleção o usuário deve escolher entre as opções:

- **Quebrar Lineamentos** ou;
- **Extremos dos Lineamentos.**

Na primeira opção (Figura 1 - b), caso os lineamentos contenham diversos segmentos, estes serão convertidos (como discutido anteriormente) em segmentos individuais. Na segunda opção (Figura 1 - c) somente os extremos dos lineamentos serão computados.

3. O arquivo deve ser selecionado no *frame* à esquerda da janela (Figura 1 - a):

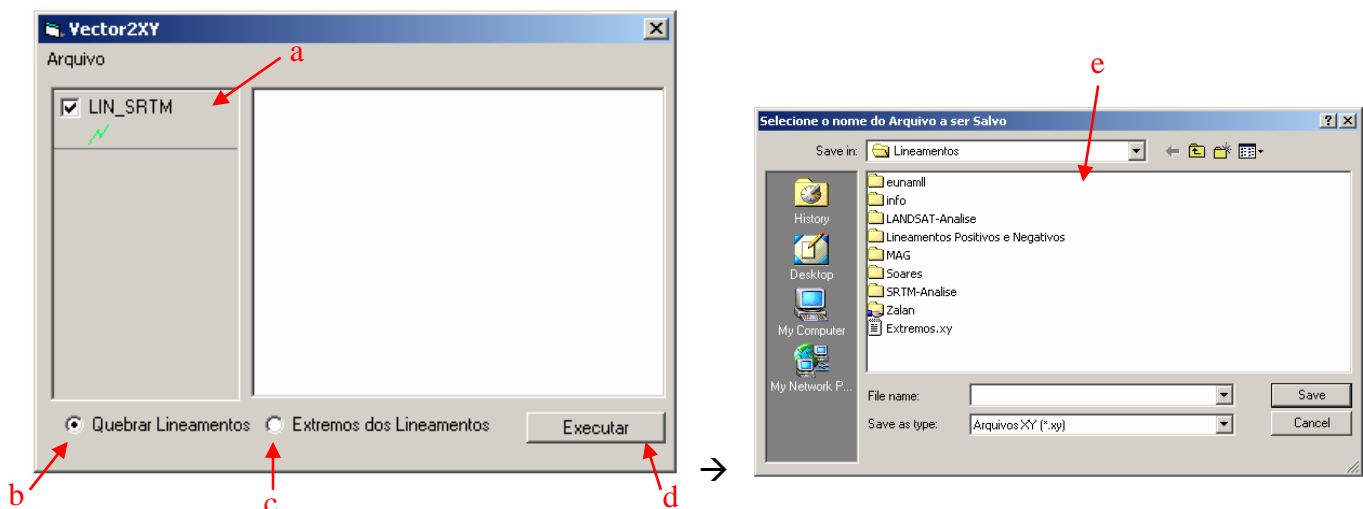


Figura 1 – Aspecto do aplicativo Vector2XY

4. Então pode-se executar a extração dos extremos clicando no botão **Executar** (Figura 1 - d). Ao clicar este botão uma janela, pedindo a indicação do nome do arquivo que será salvo, se abrirá (Figura 1 - e). Além do arquivo ASCII criado, a janela ao lado do frame

com o nome dos arquivos abertos conterá as coordenadas dos extremos dos lineamentos, separadas por vírgulas.

Após estes procedimentos o arquivo criado deverá ser convertido para o formato Dbase (DBF). Isto pode ser feito com alguma planilha eletrônica (e.g. Open Office Calc ou Microsoft Excel).

Em posse das coordenadas dos extremos dos lineamentos em formato DBF, pode-se iniciar o uso do aplicativo LinAnalyst.

2) Após iniciado o aplicativo, deve-se selecionar o arquivo DBF a partir dos menus do *frame* **Seleção do Banco de Dados** (Figura 2 - a). Os dados podem então ser visualizados a partir de uma planilha (**Visualizar** – Figura 2 - b). Para inserir os dados no programa pode-se dar duplo clique no nome do arquivo ou então marcar o arquivo e clicar o botão **Conectar** (Figura 2 - c). Obs: Os nomes dos arquivos devem conter até no máximo 8 caracteres.

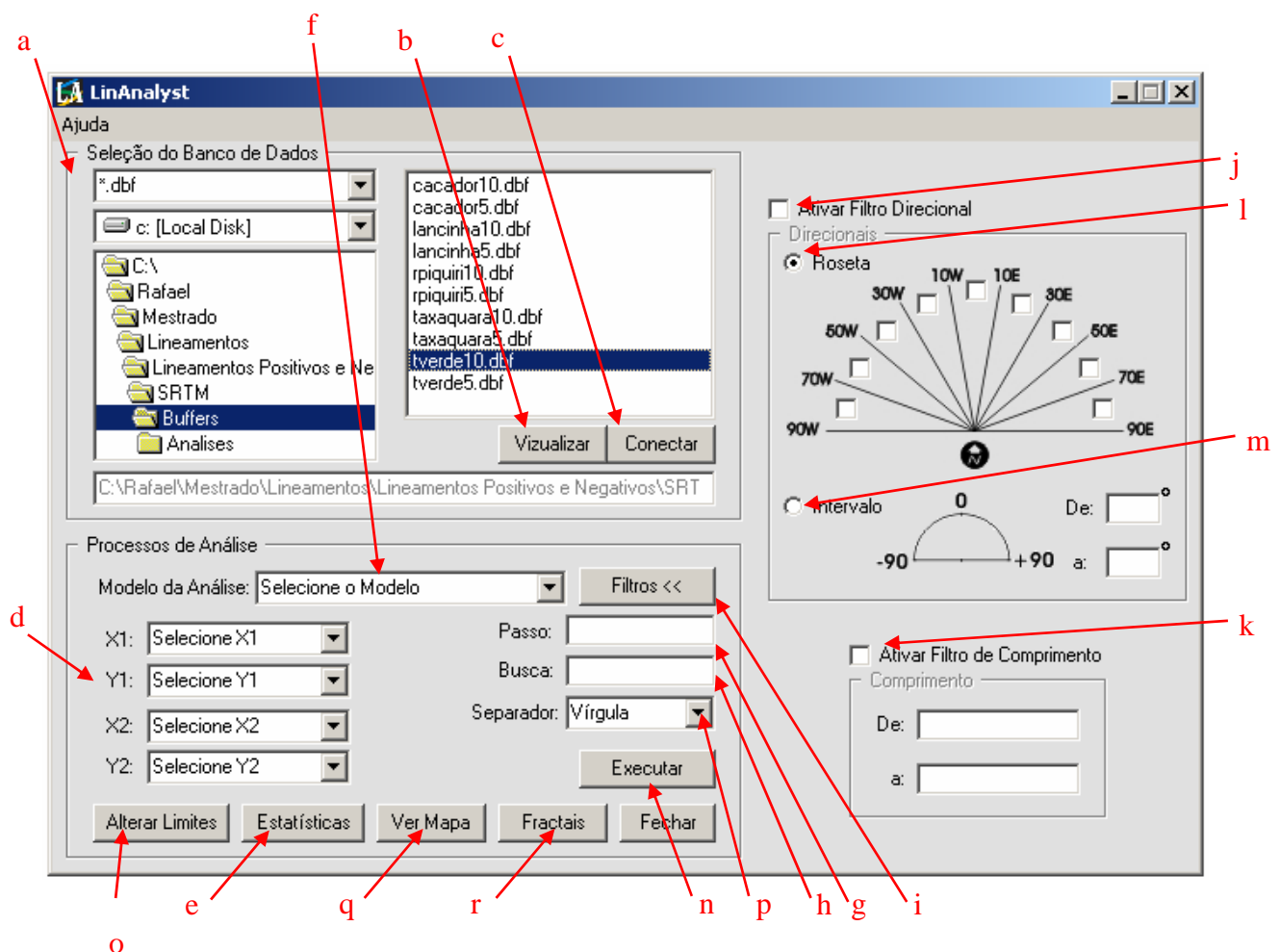


Figura 2 – Painel principal do LinAnalyst

Após a abertura do arquivo DBF, deve-se indicar os extremos X1, Y1, X2 e Y2 (Figura 2 - d).

Com os extremos indicados, pode-se obter as estatísticas gerais para os lineamentos através do botão **Estatísticas** (Figura 2 - e). Após clicar este botão uma janela com dados relacionados ao conjunto de lineamentos será aberta (Figura 3). Estes dados podem ser salvos

em um arquivo ASCII através do botão **Salvar** (Figura 3 - a). Ainda a partir deste painel pode ser acionado o módulo de rosetas (Figura 4).

Neste painel podem ser indicados diversos aspectos quanto aos diagramas que serão elaborados. No frame superior (Figura 4 - a) podem ser selecionados nome para a figura, Indicação com estatísticas gerais, porcentagens, número de pétalas e se os diagramas serão semi-círculos ou círculos (360°). Ainda podem ser escolhidas cores para as pétalas e para o círculo.

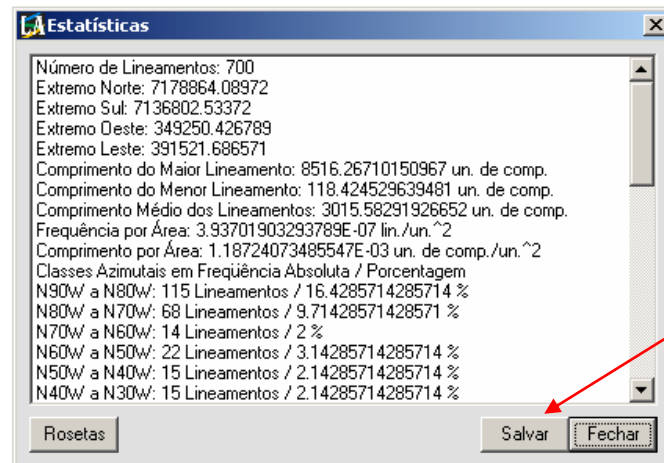


Figura 3 – Painel de estatísticas

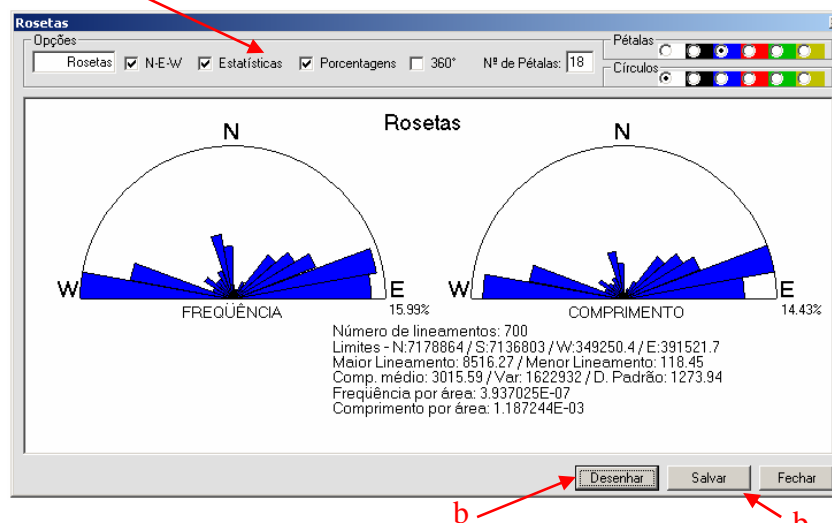


Figura 4 – Painel dos diagramas de rosetas

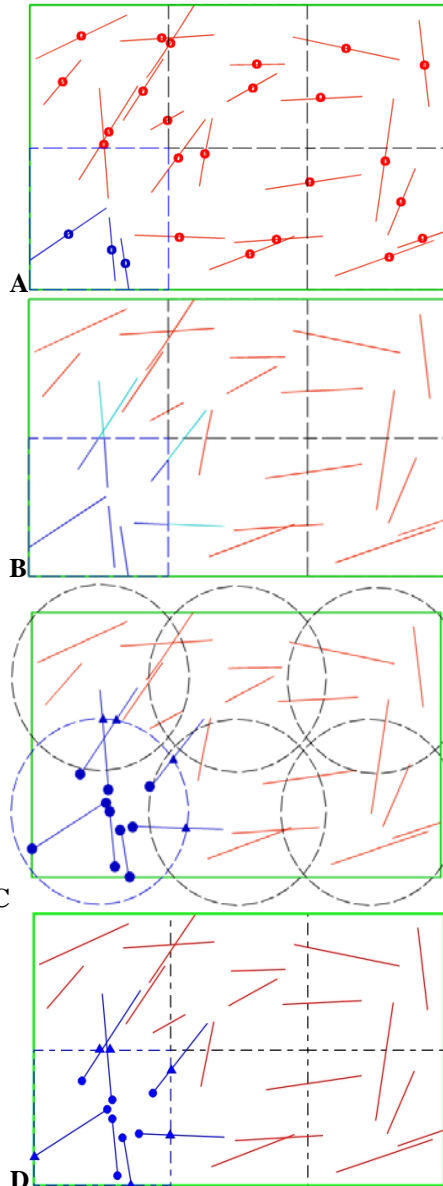
Para gerar os diagramas deve-se clicar no botão **Desenhar** (Figura 4 - a). Para salvar a figura criada (formato BMP) deve-se usar o botão **Salvar** (Figura 4 - b).

Novamente no painel geral (Figura 2), podemos executar as análises de contagem. Os métodos de análises disponíveis são 4 e encontram-se descritos na figura 5. Para maiores detalhes sobre estes métodos, consulte a dissertação de mestrado no qual foi desenvolvido o aplicativo. Além dos métodos indicados na figura, pode-se computar a quantidade de interseção de lineamentos em cada célula de análise.

Para selecionar o método de análise desejado deve-se utilizar a caixa de seleção (Figura 2 - f). Após selecionar o método, deve-se indicar o passo da análise (Figura 2 - g), que é relativo ao tamanho das células que serão computadas. No método de análise LBC (Linhas de Busca

Circulares), além do passo, deve-se indicar o tamanho do raio de busca (Figura 2 - h) para os círculos de amostragem.

Após estes passos, o usuário pode optar utilizar filtragens direcionais e/ou de comprimento através do botão **Filtros** (Figura 2 - i). Ao acionar este botão, um painel expansível, à direita da janela será mostrado. Para acionar a(s) filtragem(s) deve-se marcar o(s) botão(ões) **Ativar Filtro Direcional** (Figura 2 - j) e/ou **Ativar Filtro de Comprimento** (Figura 2 - k). Para as filtragens direcionais, pode-se optar pelo filtro na forma roseta (Figura 2 - l), onde selecionam-se classes específicas a serem analisadas, ou a filtragem por intervalo definido pelo usuário (Figura 2 - m). Para as filtragens por comprimento o usuário define o intervalo que será analisado. Os filtros direcionais e de comprimento podem ser usados simultaneamente.



A- No método dos centróides, para cada célula analisada são identificados os centróides presentes. A partir destes são computados frequência e comprimento acumulado destes lineamentos. Pode-se observar para a célula indicada em azul a presença de 3 centróides, portanto a frequência para esta célula é 3 e o comprimento acumulado é referente à soma do comprimento total destes mesmos três lineamentos.

B- No método indicado (grade) a contagem é executada a partir da presença do lineamento. Independente da parte inserida na célula analisada a presença acrescenta uma unidade à frequência de lineamentos. Além da frequência, neste método também são computados comprimento parcial e total dos lineamentos que interceptam a célula.

C- Neste método, conhecido como linhas de busca circulares, além do espaçamento da grade, o usuário indica o raio da linha de busca. O programa então detecta interseções dos lineamentos com o círculo de busca (parâmetro n, indicado por triângulos) e terminações dos lineamentos que estejam inseridos no círculo de busca (parâmetro m, indicado por círculos). A partir destes dois valores são então calculados, através das equações anteriormente indicadas, intensidade, comprimento e densidade de lineamentos.

D- Variação do método anterior. Os pontos de interseção e internos são computados a partir de uma grade regular quadrada. Com estes valores são então calculados os atributos intensidade, comprimento e densidade de lineamentos. As fórmulas para cálculo dos atributos foram adaptadas com relação à área das células de busca.

Figura 5 – Alguns métodos de análise de contagem implementados.

Após estas etapas indicadas, seleciona-se o tipo de separador (vírgula, espaço ou tabulação) que será usado no arquivo de saída (Figura 2 - p). Outra possibilidade é a alteração dos limites da análise. Em uma análise onde não sejam alterados os limites, são detectados os extremos leste, oeste, norte e sul, automaticamente, e usados como limites de análise. Caso deseje-se

alterar os limites da análise deve clicar sobre o botão **Alterar Limites** (Figura 2 - o). São indicados, então, em uma janela que se abre os limites padrões (extremos) e há quatro caixas de texto para indicação dos novos limites que serão usados (Figura 6).

Figura 6 – Janela para alteração dos limites de análise

Depois das configurações indicadas a análise pode ser feita através do botão **Executar** (Figura 2 - n). Após o término da execução será aberta uma janela para indicação do nome arquivo que será salvo. O arquivo de saída é no formato ASCII (extensão XYA), e contém as coordenadas X e Y centrais das células analisadas, além dos parâmetros calculados, conforme o tipo de análise executado (Figura 7). Pode-se também optar por salvar um arquivo (extensão SOBRE) com os parâmetros usados na análise (Figura 8).

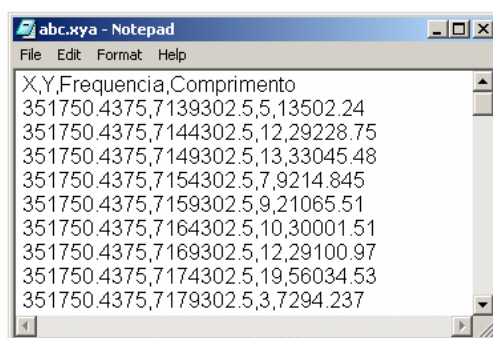


Figura 7 – Aspecto do arquivo ASCII gerado.

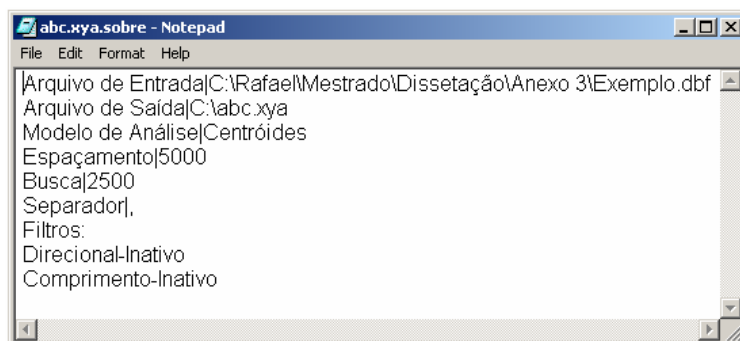


Figura 8 – Aspecto do arquivo com as especificações da análise.

Outras possibilidades do programa LinAnalyst são relacionadas a visualização e geração de mapas. Este módulo é acionado através do botão **Ver Mapa** (Figura 2 - q).

Neste módulo (Figura 9) as opções de visualização e geração de mapas são acessadas através de **Opções → Opções de Mapa**. Para visualização podem ser inseridos os lineamentos (Figura 10 - a). Podem ser classificados conforme classes de comprimento ou angular. Note que para esta classificação os lineamentos apresentam cores distintas para cada classe. Podem ser agrupados em 2, 4 ou 8 classes, tanto para a classificação angular como de comprimento. O aspecto de uma classificação angular para 4 direções está na figura 11.

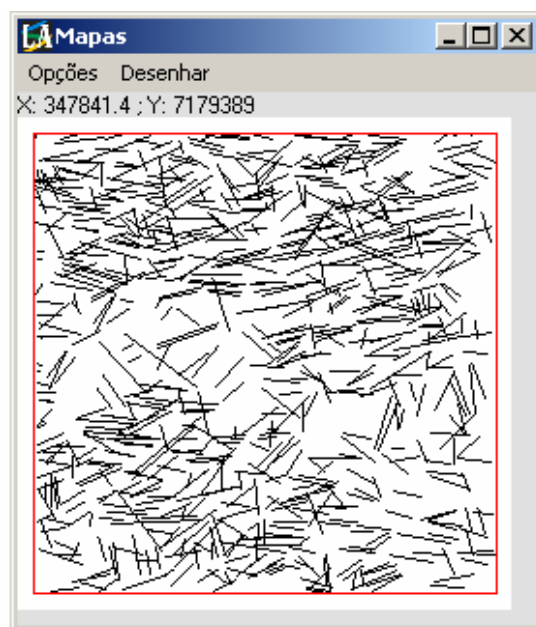


Figura 9 – Visualização de mapas

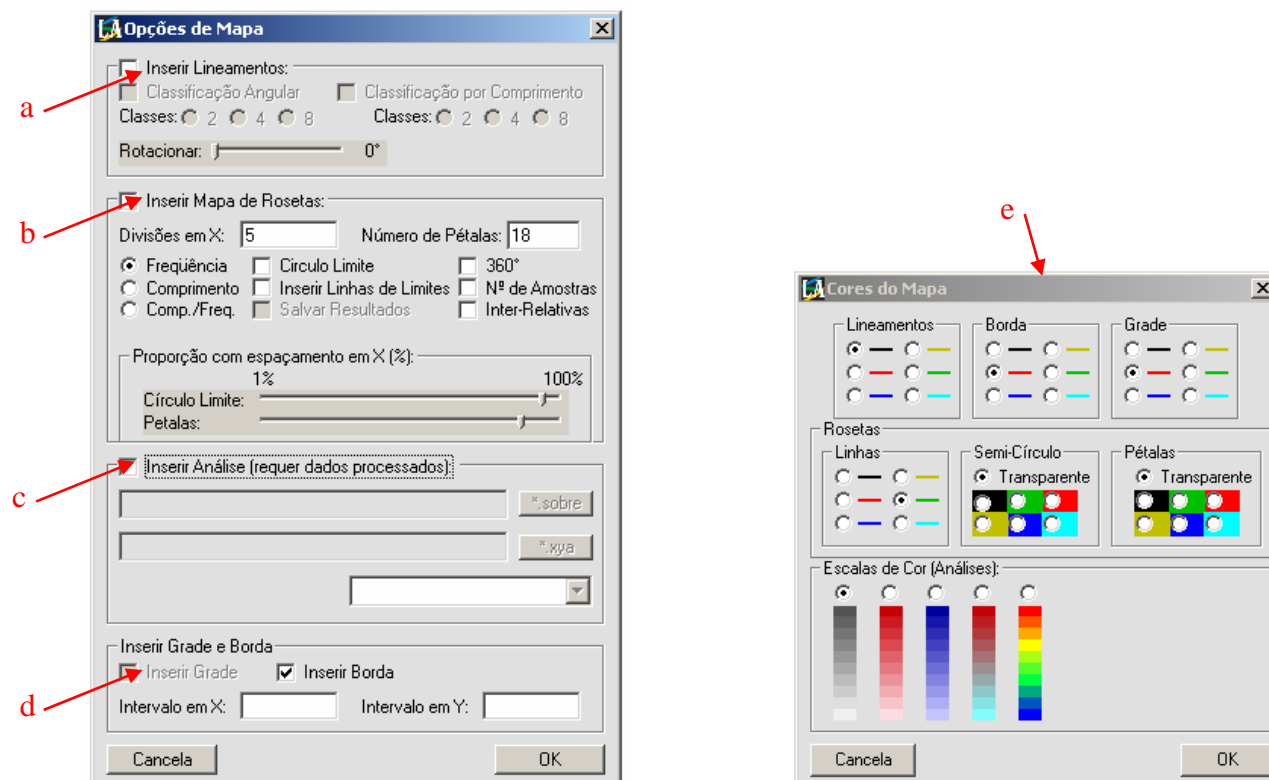


Figura 10 – Opções de Mapa e de Cor

Na opção inserir mapa de rosetas (Figura 10- b), pode-se escolher o número de células em que o mapa será analisado (Divisões em X), número de pétalas, tipo de diagrama (Frequência; Comprimento; ou Comprimento/Frequência), inserir o círculo limite do diagrama, inserir limites das células analisadas, escolher se o diagrama será semi-circular ou círculo completo (360°), inserir número de amostras, e se as rosetas terão tamanhos proporcionais nas diferentes células (Inter-Relativas). Pode-se também indicar a proporção de o círculo e as pétalas terão com relação às células de análise (Proporção do espaçamento em X. O aspecto de um mapa de rosetas pode ser observado na figura 12.

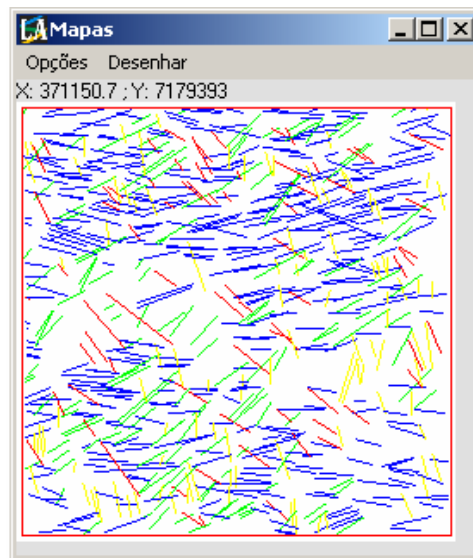


Figura 11 – Aspecto de uma classificação angular.
(Azul – E-W; Amarelo – N-S; Vermelho – NW; Verde – NE)

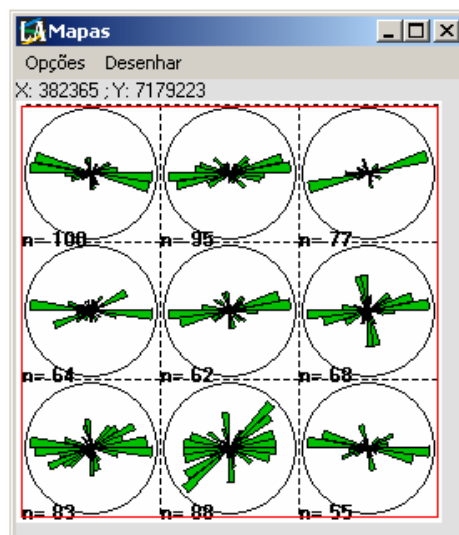


Figura 12 – Aspecto de um mapa de rosetas gerado.

A figura 10- c indica o campo referente à visualização de análises de contagem executadas. O arquivo com as especificações da análise deve ter sido salvo para visualização desta análise. A partir da indicação deste arquivo (botão ***.sobre**) previamente processado, o arquivo de extensão XYA será localizado (o local onde foi salvo não deve ter sido mudado!). Após estas etapas seleciona-se o atributo que será visualizado na caixa de seleção logo abaixo. Um

arquivo processado pode ser visualizado na figura 13. Note que esta visualização é bastante precária. A geração de um mapa de contorno, em um aplicativo distinto (e.g. Spring, Surfer, ArcMap), é indicado para uma visualização mais detalhada.

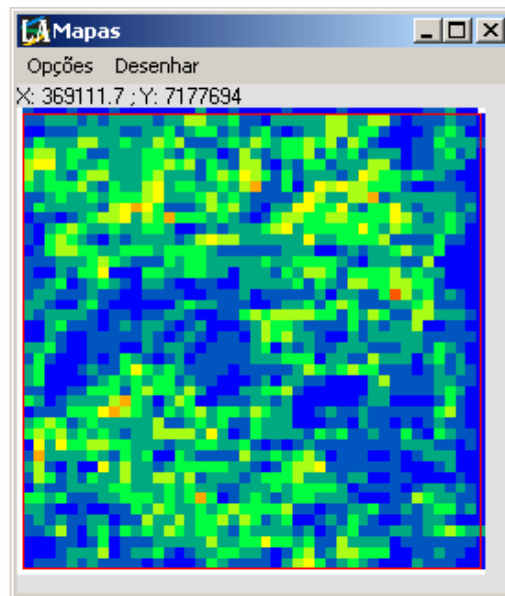


Figura 13 – Aspecto da visualização de um mapa de contagem
(Método grade, atributo frequência).

Podem também ser inseridas grades regulares, bem como a borda da área analisada (Figura 10- d). Na figura 10 - e estão indicadas as possibilidades de cores para os mapas criados.

Após a indicação das opções de mapa e cor desejadas, para desenhar o mapa o usuário deve clicar em **Desenhar → Zoom Tudo**.

O mapa gerado pode ser salvo em formato BMP através de **Opções → Salvar Imagem**. Através deste comando será mostrada uma nova janela (Figura 14). Nesta janela o usuário pode optar por salvar o mapa no tamanho em que se encontra (Figura 14 - a), ou alterar este tamanho (Figura 14 - b) indicando as novas dimensões em *pixels* (Figura 14 - c). Após a seleção dos parâmetros deve-se clicar no botão **Salvar** (Figura 14- d).



Figura 14 – Janela com opções para salvar mapa

Através do botão **Fractais** (Figura 2 - r), no painel principal, é acionado o módulo de **Análise Fractal** (Figura 15).

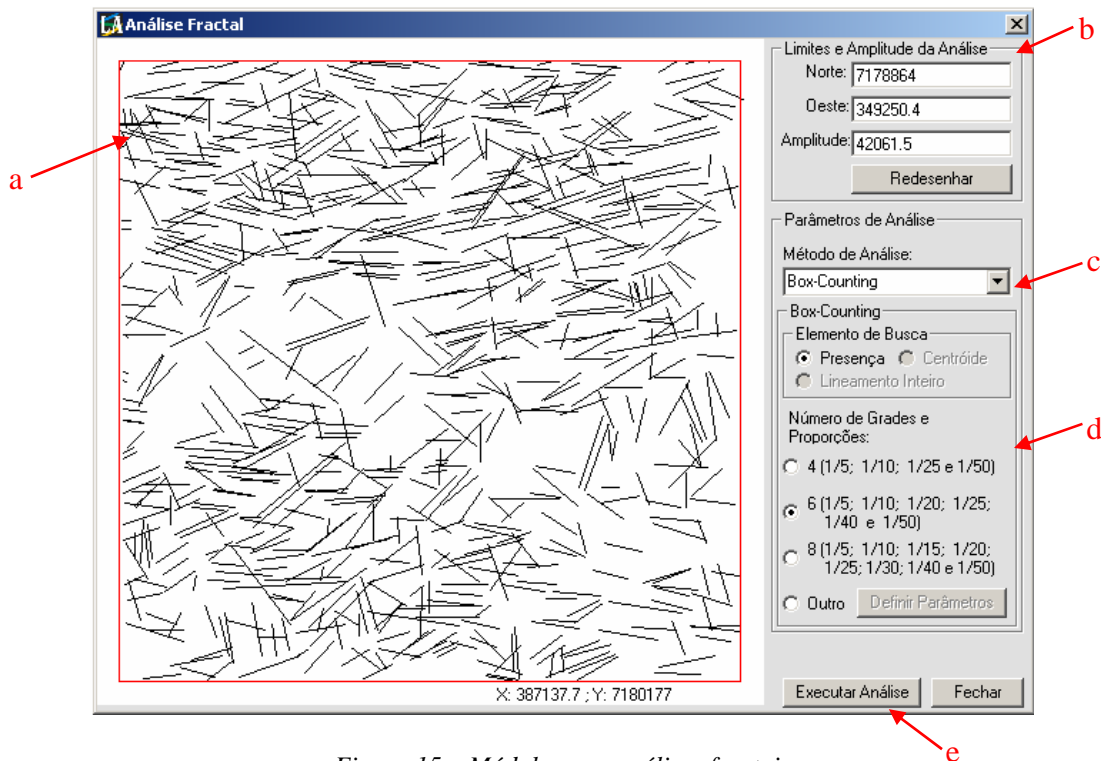


Figura 15 – Módulo para análises fractais

Quando acionado o painel de Análise Fractal todo o conjunto de lineamentos será mostrado, e um quadrado de cor vermelha, indicando os limites da análise será também mostrado (Figura 15 - a). Os limites e a amplitude deste quadrado são também mostrados (Figura 15 - b), e podem ser alterados conforme queira o usuário. Para alterar o limite de análise deve-se indicar os limites **Norte** e **Oeste**, a **Amplitude**, e posteriormente clicar no botão **Redesenhar**. No painel indicado (figura 15 – a) será, então, mostrado o novo limite de análise através do quadrado vermelho.

Para seleção do método de análise que será utilizado deve-se fazer a indicação na caixa de seleção (Figura 15 – c). Podem ser selecionados três métodos distintos (*Box-Counting*; Direcional; e Comprimento). Os métodos são comentados na dissertação de mestrado. Conforme seja alterado o método de análise, o painel logo abaixo (Figura 15 - d) será também mudado. Neste painel, então, serão indicados os parâmetros usados nas análises.

Para a análise *Box-Counting*, o usuário pode definir a quantidade de grades que serão usadas, e suas proporções relacionadas à área inicial (Figura 15 - b) de análise indicada. Há três seleções já prontas, ou o usuário pode definir novos parâmetros clicando na opção **Outro**, depois no botão **Definir Parâmetros**. Caso este botão seja clicado, será mostrada uma janela com onde devem ser indicados o número de grades (Figura 16 - a) e suas proporções com relação à área original de análise (Figura 16 - b).

Após a seleção dos parâmetros, a análise é executada através do botão **Executar Análise** (Figura 15 - e). Depois de executada a análise, será mostrada uma janela para visualização dos resultados (Figura 17). Clicando no botão **Pontos** (Figura 17 - a) serão plotados os pontos

referentes a cada grade em um diagrama Log-Log. Através do botão **Ajustar Reta** (Figura 17 - b), uma reta será, através do método dos mínimos quadrados, ajustada aos pontos anteriormente plotados. Os parâmetros do coeficiente angular desta reta (D - Dimensão Fractal) e do coeficiente de correlação (r) também são indicados no gráfico. O gráfico pode ser salvo em formato BMP a partir do botão **Salvar** (Figura 17 - c).

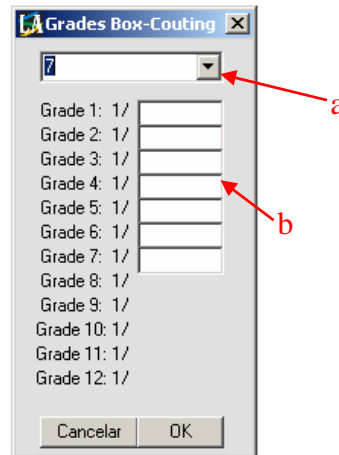


Figura 16 – Módulo para análises fractais

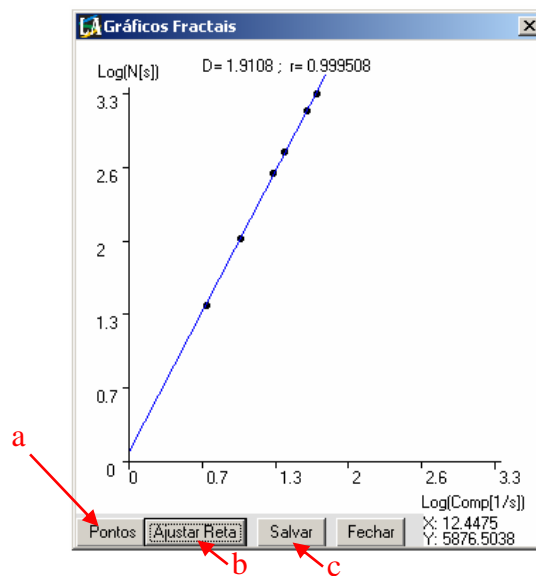


Figura 17 – Visualização dos resultados da análise Box-Counting

Quando selecionado o método de análise **Direcional** (Figura 15 - c), o usuário tem a possibilidade de escolher a quantidade de linhas de busca, para cada uma das 18 direções analisadas - caixa de texto **Linhas de Busca (horizontal)**. O outro parâmetro que o usuário pode selecionar é o número de classes utilizadas no cálculo da dimensão fractal para cada direção analisada (caixa de texto **Número de Classes**). Após a execução da análise será mostrada uma janela com gráficos indicando os resultados (Figura 18). Os três gráficos gerados podem ser visualizados a partir da mudança na caixa de seleção (Figura 18 - a). O gráfico **Comprimento Médio** apresenta a média dos fragmentos computados entre os linemantos para a direção indicada no gráfico, de 10° em 10°. Os gráficos **Fractais-Comprimento** e **Fractais-Frequência** indicam a dimensão fractal, ajustada a partir dos segmentos intactos (distâncias entre lineamentos) para cada classe direcional.

Através do botão **Salvar** (Figura 18 - b) o gráfico ativo será gravado em formato BMP.

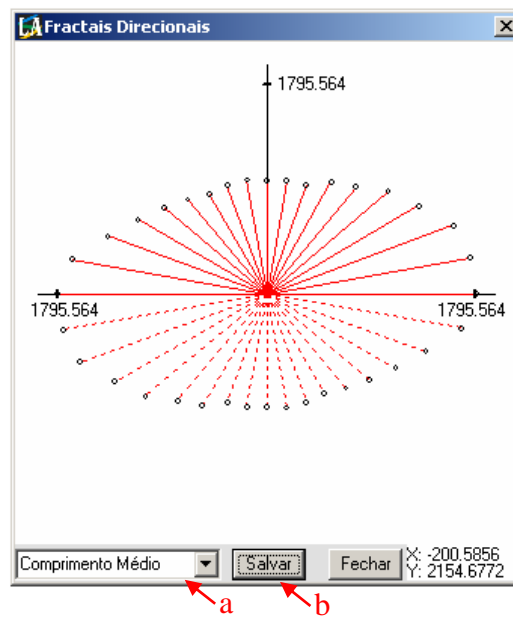


Figura 18 – Visualização dos resultados da análise Direcional

O método de análise **Comprimento** (Figura 15 - c) calcula a dimensão fractal a partir dos comprimentos de todo conjunto de lineamentos. Para esta análise o usuário pode indicar os parâmetros **Número de Intervalos** (número de classes em que serão classificados os comprimentos dos lineamentos para cálculo da dimensão fractal) e qual o tipo da análise (se **Comprimento/Frequência**; **Frequência**; ou **Comprimento**). Para cada uma destas análises o usuário pode ainda selecionar se os gráficos serão elaborados com valores acumulados ou não. Após a seleção dos parâmetros e execução da análise, será mostrada uma figura semelhante àquela do método *Box-Counting*, onde deverá selecionar a indicação dos pontos computados e posteriormente ajustar uma reta a eles.

Sigmas v. 1.0.0

MANUAL DO APLICATIVO

Cálculo e visualização de paleotensões utilizando o critério de Mohr-Coulomb.

Programa desenvolvido durante a dissertação de mestrado intitulada:

Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná.

Rafael Correia de Freitas

*Qualquer dúvida, favor entrar em contato com:

rcdfreitas@click21.com.br

Para maiores detalhes referentes aos métodos utilizados na implementação do aplicativo, bem como sobre o critério de Mohr-Coulomb, veja a dissertação de mestrado.

1) Dados de entrada:

Os dados de entrada para cálculo de σ_1 , σ_2 e σ_3 são referentes à atitude do plano de falha, bem como da estria, em formato Clar, e da direção de movimentação da falha. Estes dados podem ser inseridos individualmente ou a partir de planilhas em formato ASCII.

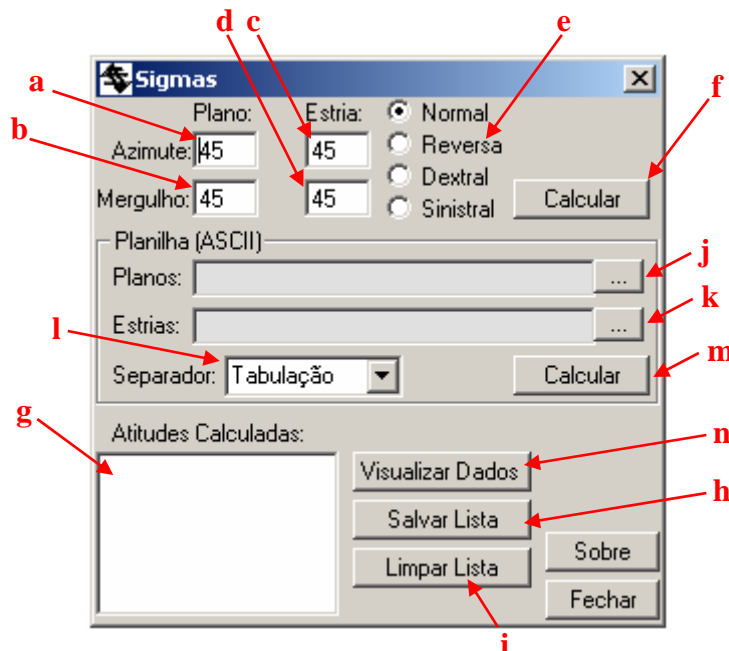


Figura 1 – Painel de entrada de dados

- Entrada manual de dados:

Para a inserção individual de atitudes e cinemática devem ser indicados azimuth (Figura 1 - a) e mergulho (Figura 1 - b) do plano de falha, azimuth (Figura 1 - c) e mergulho (Figura 1 - d) da estria e cinemática (Figura 1 - e) envolvida.

Após a indicação dos parâmetros as atitudes de σ_1 , σ_2 e σ_3 podem ser calculadas a partir do botão **Calcular** (Figura 1 - f). Após o processamento, as atitudes calculadas para σ_1 , σ_2 e σ_3 serão indicadas no painel **Atitudes Calculadas** (Figura 1 - g). Estas atitudes podem ser salvas em arquivos ASCII através do botão **Salvar Lista** (Figura 1 - h). Os arquivos ASCII de saída são três: tensões máximas (σ_1), intermediárias (σ_2) e mínimas (σ_3), salvos, respectivamente, nesta ordem.

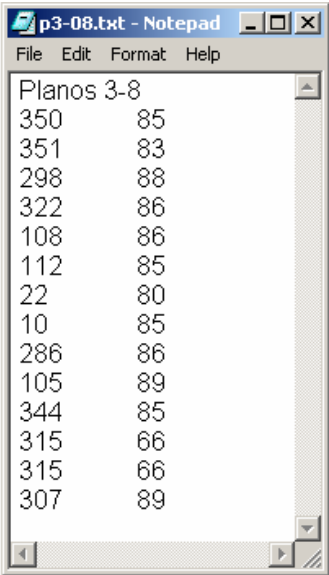
Através do botão **Limpar Lista** (Figura 1 - i) as atitudes são excluídas do painel **Atitudes Calculadas**.

- Entrada de dados através de planilhas:

Os dados de entrada devem estar separados em duas planilhas diferentes. A primeira delas, referente aos planos de falhas, deve ser indicada a partir do botão ao lado da caixa de texto **Planos** (Figura 1 - j). Esta planilha deve conter na primeira coluna o azimuth de máximo mergulho dos planos e na segunda seu mergulho (Figura 2 - a). A segunda planilha, referente às estrias, deve ser indicada a partir do botão ao lado da caixa de texto **Estrias** (Figura 1 - k). Esta planilha deve conter na primeira coluna o azimuth da estria, na segunda seu mergulho, e ainda uma terceira coluna com a indicação cinemática (Figura 2 - b). A indicação cinemática é feita da seguinte forma:

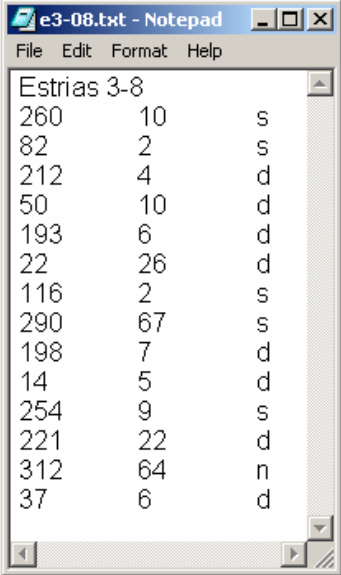
Sinistral: “s” Dextral: “d” Normal: “n” Reversa: “r”

a



Planos 3-8	
350	85
351	83
298	88
322	86
108	86
112	85
22	80
10	85
286	86
105	89
344	85
315	66
315	66
307	89

b



Estrias 3-8		
260	10	s
82	2	s
212	4	d
50	10	d
193	6	d
22	26	d
116	2	s
290	67	s
198	7	d
14	5	d
254	9	s
221	22	d
312	64	n
37	6	d

Figura 2 – Aspecto das planilhas para entrada de dados

Após a indicação das planilhas, deve-se selecionar o tipo de **Separador** usado (Figura 1 - l) e, então, as tensões podem ser computadas clicando-se sobre o botão **Calcular** (Figura 1 - m). Após o processamento, as atitudes calculadas para σ_1 , σ_2 e σ_3 serão indicadas no painel **Atitudes Calculadas** (Figura 1 - g). As atitudes podem ser salvas como indicado na entrada manual de dados.

1) Visualização dos dados:

Após o cálculo das atitudes para as tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 , pode-se observar as paleotensões clicando-se no botão **Visualizar Dados** (Figura 1 - n). Será então aberta uma janela (Figura 3), com um estereograma, onde as atitudes serão plotadas.

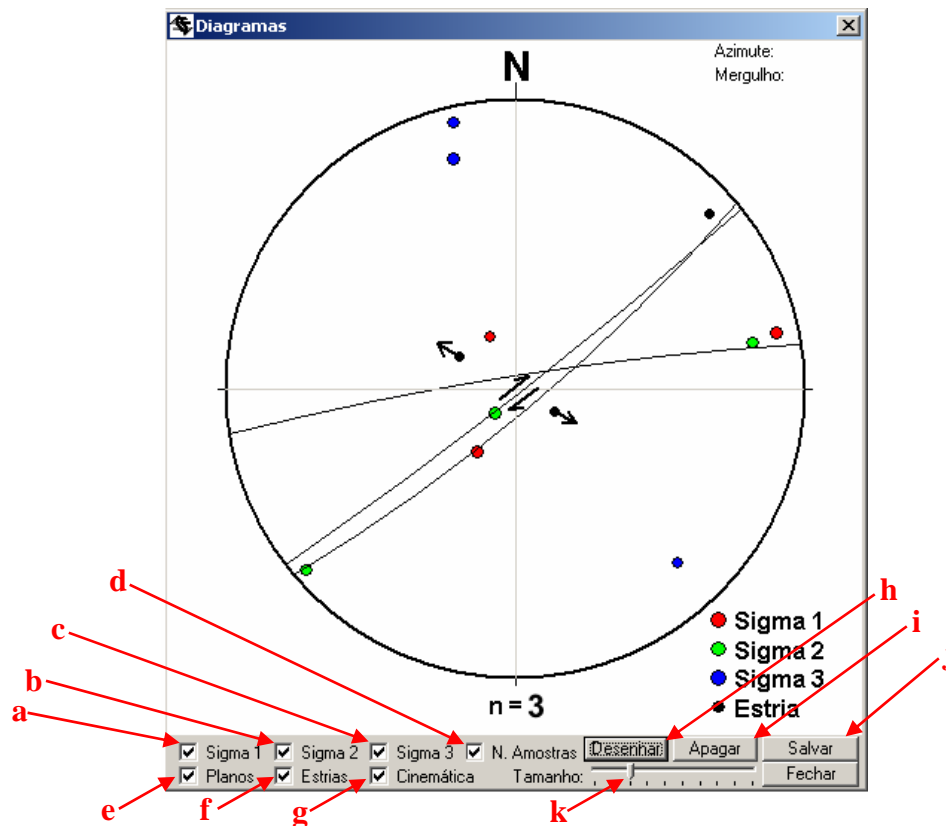


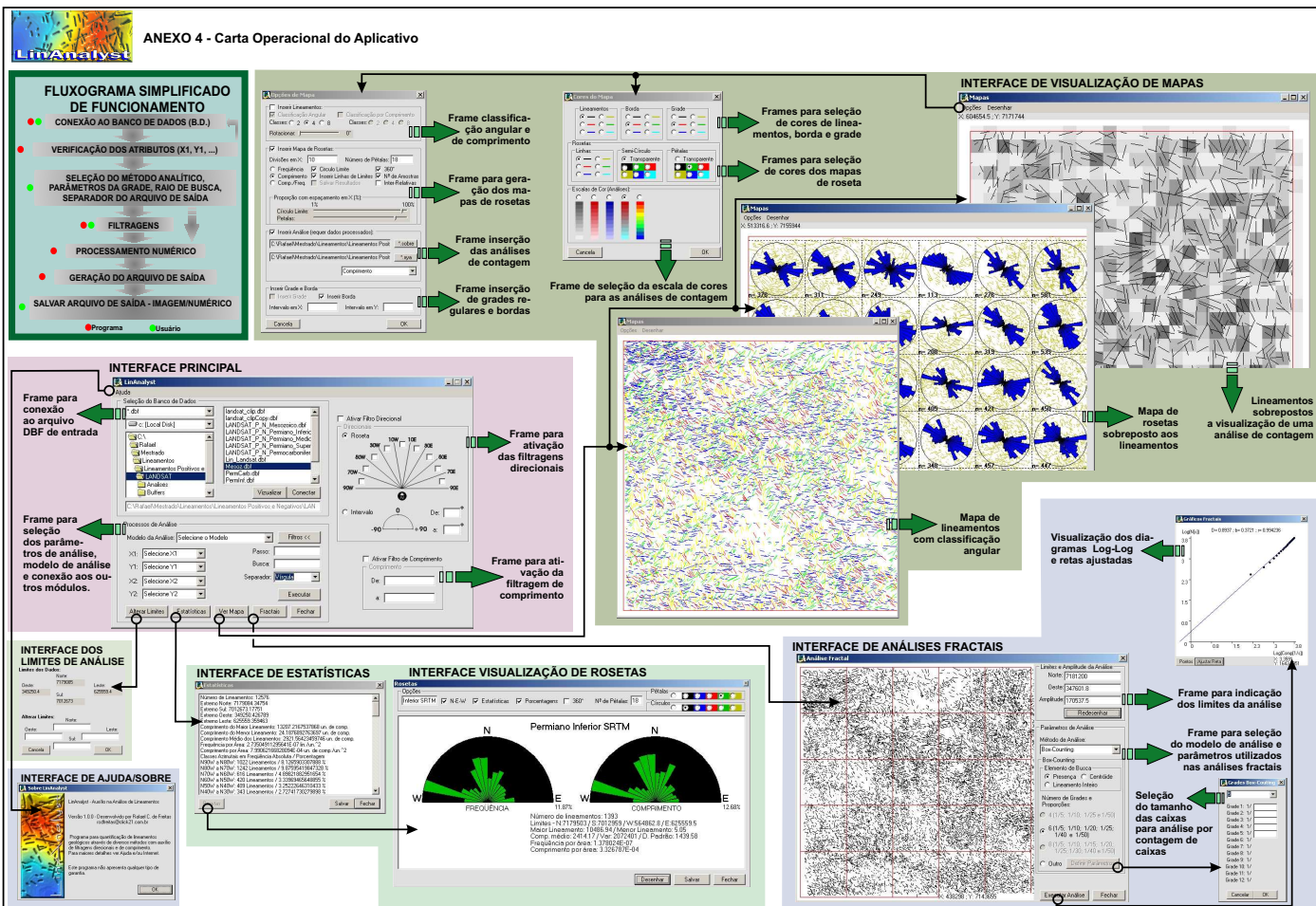
Figura 3 – Visualização dos dados calculados

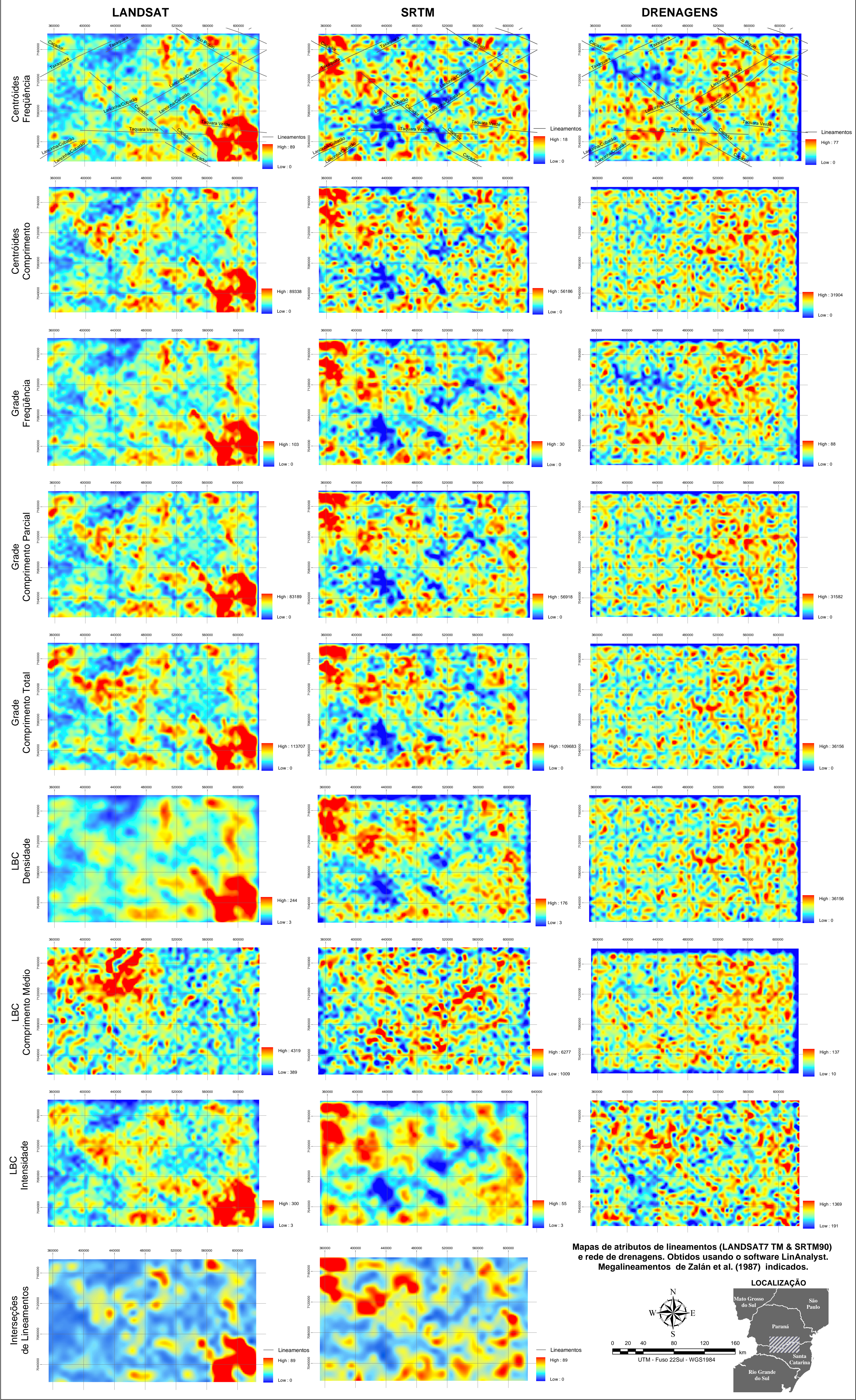
No diagrama o usuário pode selecionar a indicação de diversos elementos:

- σ_1 (Figura 3 - a);
- σ_2 (Figura 3 - b);
- σ_3 (Figura 3 - a);
- Número de Amostras (Figura 3 - d);
- Planos de Falha (Figura 3 - e);
- Estrias (Figura 3 - f) e
- Indicação cinemática (Figura 3 - g).

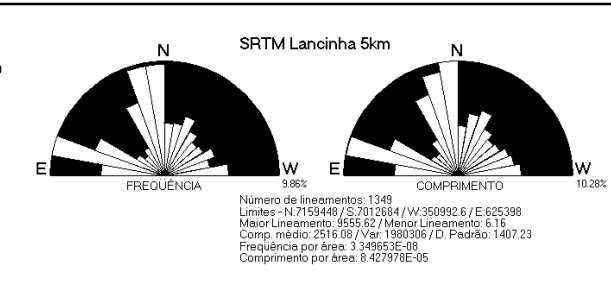
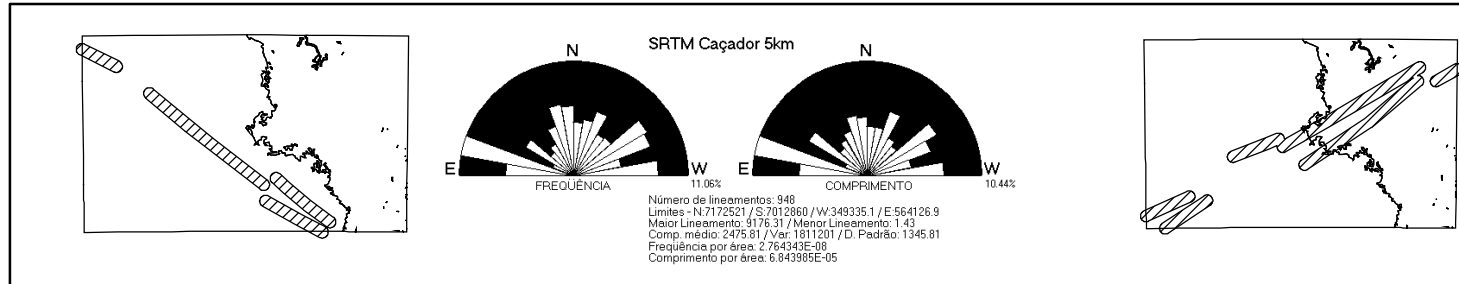
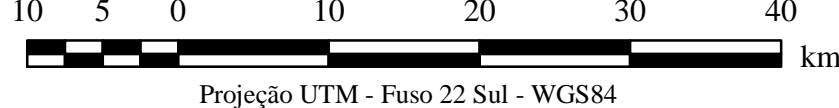
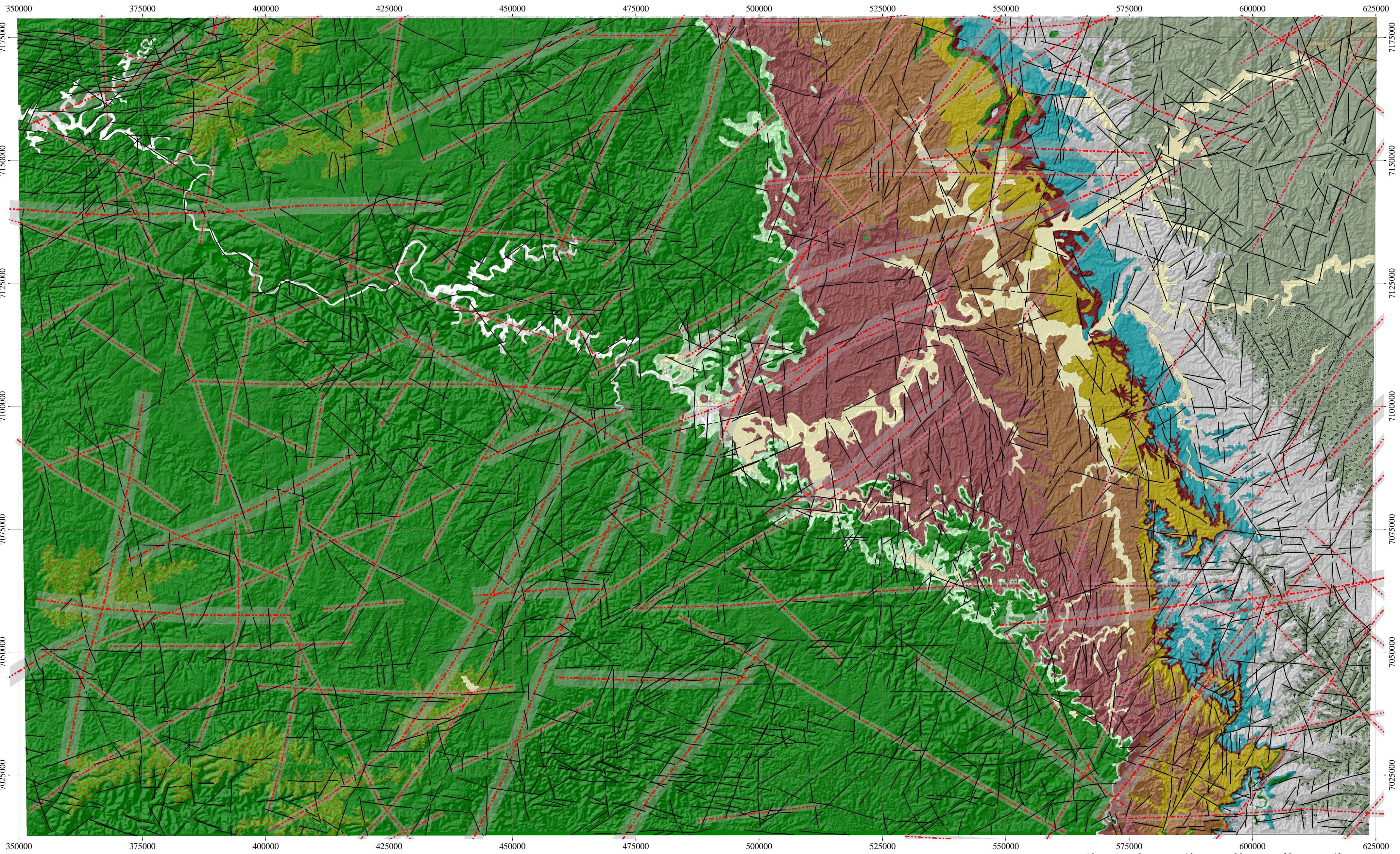
Após a seleção dos elementos que irão estar presentes, o diagrama é criado através do botão **Desenhar** (Figura 3 - h). Serão indicados no diagrama os elementos referentes às atitudes que estiverem contidas na caixa de texto **Atitudes Calculadas** (Figura 1 - g). Através do botão **Apagar** (Figura 3 - i) o diagrama é excluído, e clicando-se sobre o botão **Salvar** (Figura 3 - j) o diagrama será convertido para uma figura BMP. Com a barra de seleção **Tamanho** (Figura 3 - k) os pontos referentes às paleotensões e estrias são aumentados ou diminuídos, conforme movimentação à direita ou à esquerda, respectivamente.

ANEXO 4 - Carta Operacional do Aplicativo

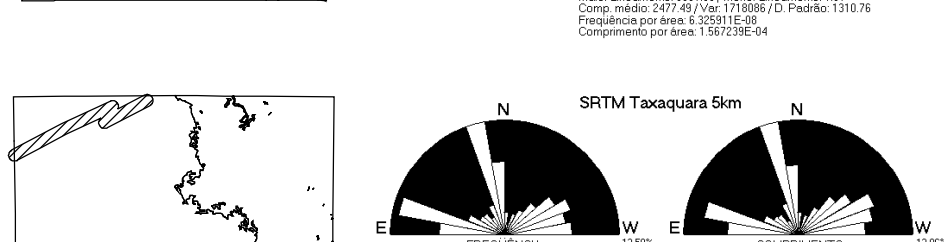
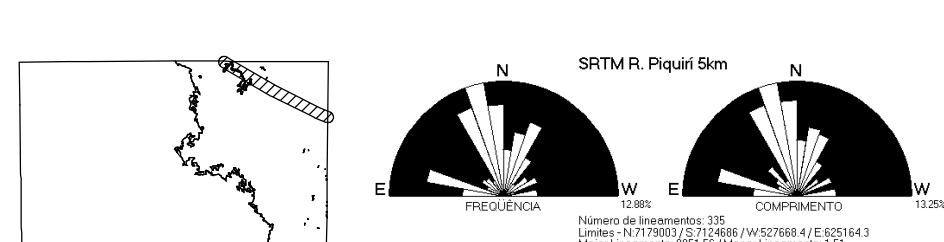
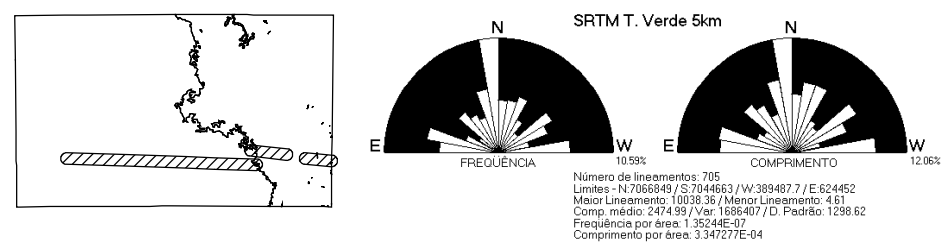




ANEXO 6 - Mapa Lito-Estrutural da Área de Estudo



Comportamento Direcional das Estruturas Superficiais Interpretadas Condicionadas pelos Megalineamentos definidos por Zalán et al. (1987 e 1990). Buffers de análise em 5 km.

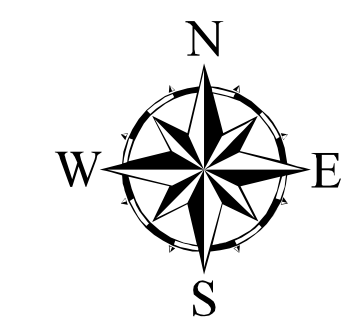


LEGENDA

ESTRUTURAS
Lineamentos Superficiais
— 2º e 3º Ordem (Landsat & SRTM)
Lineamentos de Subsuperfície
--- Embasamento (MAG & Bouguer)
--- Intermediários (MAG & Free-Air)

UNIDADES GEOLÓGICAS

Quaternário Indiferenciado
GRUPO SÃO BENTO
Fm. Serra Geral - Derrames e Soleiras
Fm. Serra Geral - Efusivas Diferenciadas
Formações Pirambóia e Botucatu
GRUPO PASSA DOIS
Formação Rio do Rasto
Formação Teresina
Formação Serra Alta
Formação Irati
GRUPO GUATÁ
Formação Palermo
Formação Rio Bonito
GRUPO ITARARÉ
Grupo Itararé Indiferenciado
Formação Rio do Sul
Formação Mafra
GRUPO PARANÁ
Formação Furnas

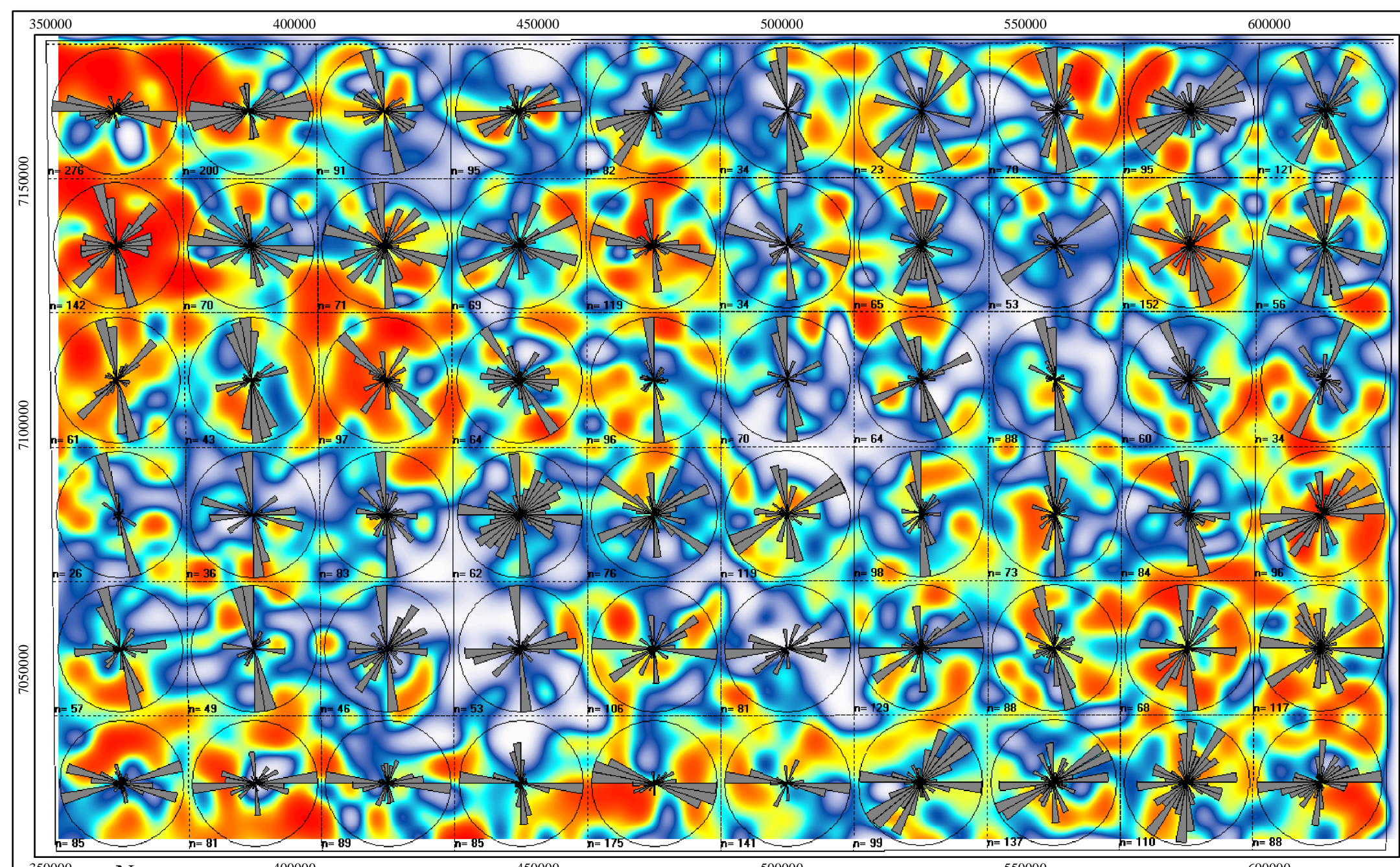
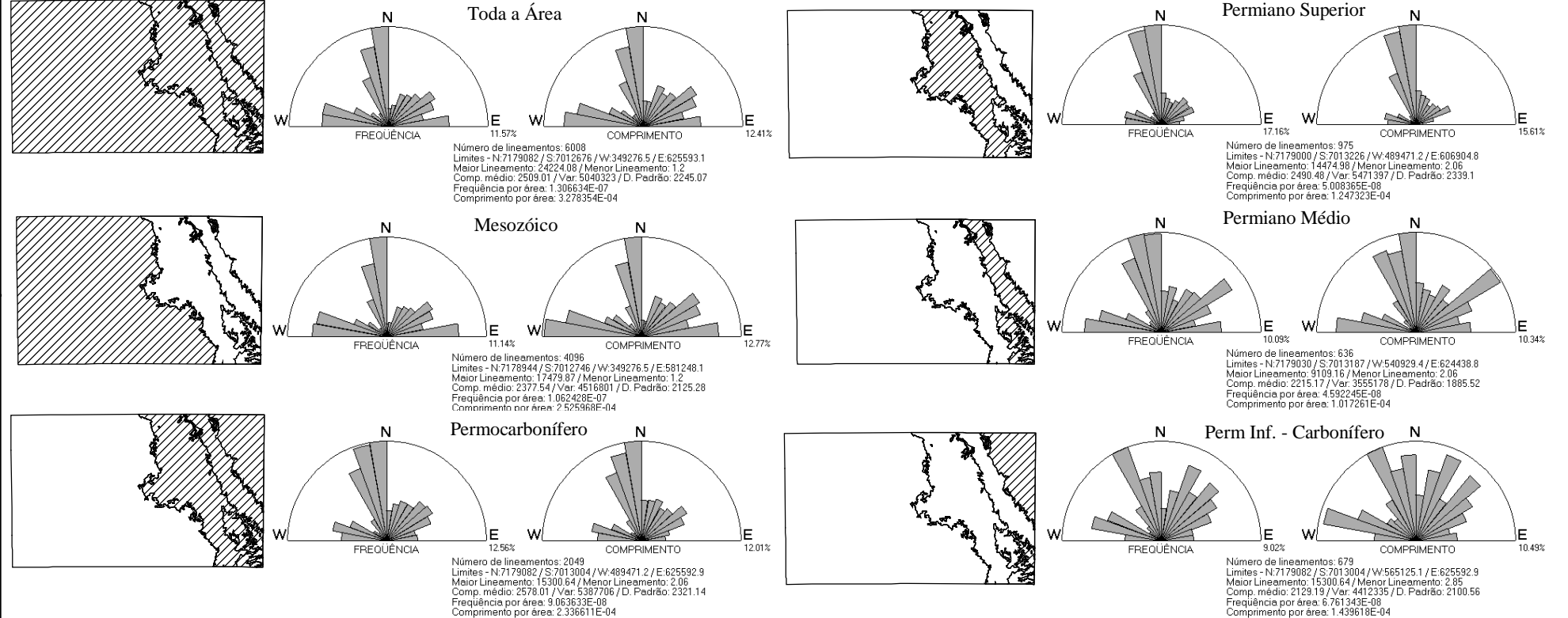


ESCALA
1:500.000
LOCALIZAÇÃO



Mapa Litológico compilado de DNPM & MINEROPAR (1989) e DNPM/SC, 1986.

Comportamento dos Lineamentos Superficiais (SRITM) nas Exposições de Rochas de Diferentes Tempos Geológicos



Mapa de rosetas (Frequência Acumulada de Centróides) para os lineamentos interpretados sobreposto ao mapa de frequência de lineamentos traçados sobre MDE SRTM90.

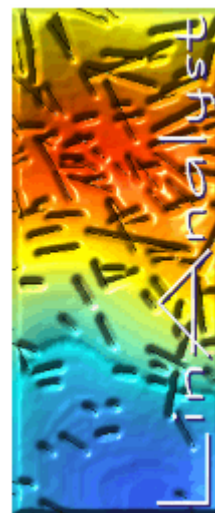
LinAnalyst v. 1.0.0

MANUAL DO APLICATIVO

Auxílio na Análise de Lineamentos.
Programa desenvolvido durante a
dissertação de mestrado intitulada:

Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero
Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná.

Rafael Correia de Freitas



* Esta é a primeira versão do programa. Portanto deve conter uma quantidade grande de *bugs*. Caso, durante a utilização, você note algum problema, ou tenha uma sugestão, favor entrar em contato com:
rcdfreitas@click21.com.br

1) Dados de entrada:

O aplicativo utiliza como dados de entrada os pares de coordenadas X e Y dos extremos de cada lineamento, em arquivos do tipo Dbase (*.dbf). Os dados devem estar no formato de uma matriz de 4 colunas por n linhas (n representa o número de lineamentos), como ilustrado abaixo:

x_1	y_1	x_2	y_2
496655	7089189	496996	7089359
496360	7106365	495673	7106407
495724	7097942	499380	7101120
497473	7110816	497437	7110849
...
n	n	n	n

O programa apresenta limitação de trabalhar com bancos de dados de até 100.000 lineamentos.

Para gerar este tipo de tabela a partir dos dados vetoriais (traçados de lineamentos) foram criados dois programas auxiliares. Caso você disponha do programa ArcMap (versão 8.0 ou superior), para a detecção das coordenadas dos extremos dos lineamentos pode ser utilizado um *script* elaborado em VBA para esta finalidade. O *script* encontra-se junto aos arquivos contidos no pacote, e sua utilização está descrita a seguir:

1.1) Obtenção das coordenadas X e Y dos extremos dos lineamentos a partir de um *script* para ArcMap:

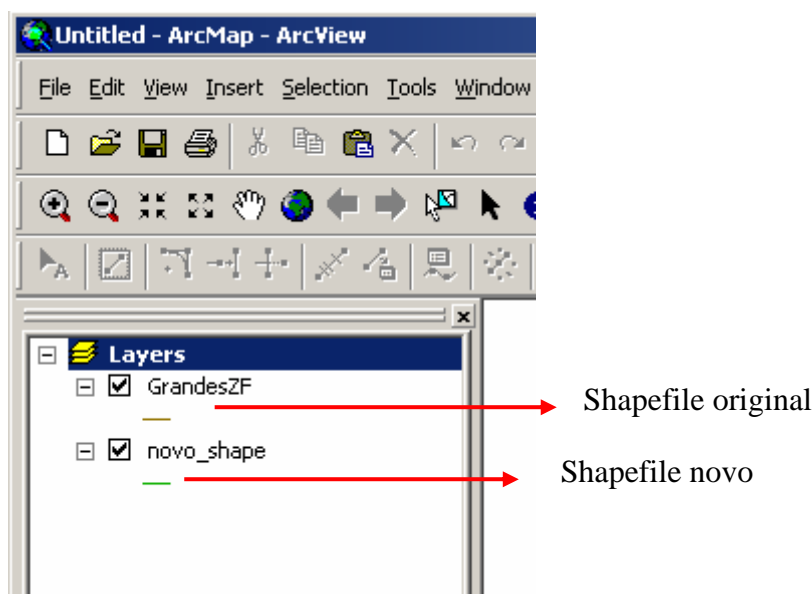
1. No programa ArcMap abra o editor VBA (**Tool** → **Macros** → **Visual Basic Editor**)
2. Abra o arquivo XYcoord.txt com algum editor de texto, copie todo o conteúdo e cole no editor VBA.
3. Salve e feche o editor VBA.
4. Para gerar o botão que acionará o *script* no ArcMap adicione um botão da seguinte forma: **Tools** → **Customize** – depois → **Commands**, em Categories: selecione **UIControls** → **New UIControl...** → **UIButtonControl** – O nome deste botão deverá

ser `UIButtonControl1_Click()` - conforme nome no *script* - Depois de criado o botão, arraste-o com o mouse até alguma barra de ferramenta do ArcMap.

Agora, para obter as coordenadas, você deve selecionar o layer (polilinhas) que deseja e clicar no botão criado. As coordenadas serão inseridas na tabela dbf associada ao shapefile. (obs: o arquivo vetorial do qual serão obtidas as coordenadas deve ser, neste caso, necessariamente um shapefile).

Note que as coordenadas obtidas são referentes aos extremos de cada polilinha. Caso a polilinha seja composta por vários segmentos, os vértices internos serão descartados. Para utilizar todos os vértices da polilinha, outro *script* está disponível. Para instalar este segundo *script* o procedimento é o mesmo dos passos 1 a 4, indicados acima. O nome do arquivo com o *script* é `Split_at_Vertex.txt`, e o nome do botão está indicado na rotina como `UIButtonControl2_Click()`.

Para utilizar este *script* é necessário criar um novo shapefile e posicioná-lo, nos layers, logo abaixo do shapefile que se deseja segmentar, como indicado abaixo.



Então seleciona-se o shapefile original e clica-se sobre o novo botão criado. O shapefile posicionado abaixo conterá os mesmos lineamentos do original, porém somente com segmentos individuais.

Agora pode-se obter as coordenadas para todos os segmentos usando o primeiro *script* indicados (`XYcoord`).

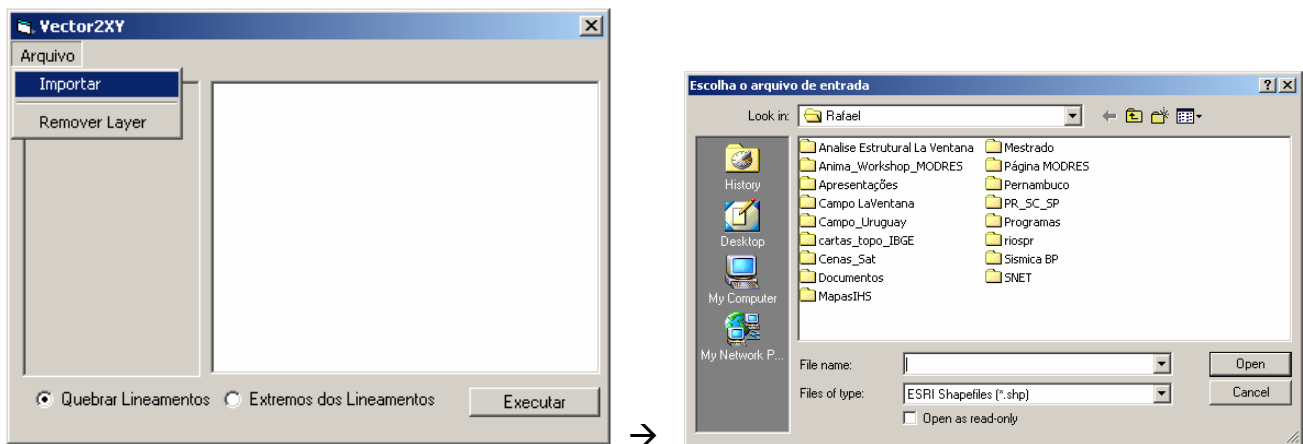
1.2) Obtenção das coordenadas X e Y dos extremos dos lineamentos com o programa Vector2XY.

O programa Vector2XY utiliza bibliotecas de rotinas do pacote MapObjects (ESRI). Desta forma, como não disponho de uma licença válida deste pacote, o programa compilado apresenta um prazo de validade até 07 de agosto de 2005. O código fonte está em anexo (projeto do Visual Basic). Caso o usuário disponha de uma licença da referida biblioteca MapObjects, poderá compilar uma versão permanente. Uma versão demonstrativa da

biblioteca ArcObjects (Atualmente na versão 2.3 – com validade de 3 meses) pode ser obtida gratuitamente no sítio da ESRI (esri.com).

As conversões com o aplicativo Vector2XY pode obter as coordenadas dos extremos de vetores nos formatos DXF(AutoCAD) e SHP (ESRI). Para conversão:

1. **Arquivo → Importar** (seleciona-se então o arquivo vetorial – DXF ou SHP)



2. Após a seleção o usuário deve escolher entre as opções:

- **Quebrar Lineamentos** ou;
- **Extremos dos Lineamentos.**

Na primeira opção (Figura 1 - b), caso os lineamentos contêm diversos segmentos, estes serão convertidos (como discutido anteriormente) em segmentos individuais. Na segunda opção (Figura 1 - c) somente os extremos dos lineamentos serão computados.

3. O arquivo deve ser selecionado no *frame* à esquerda da janela (Figura 1 - a):

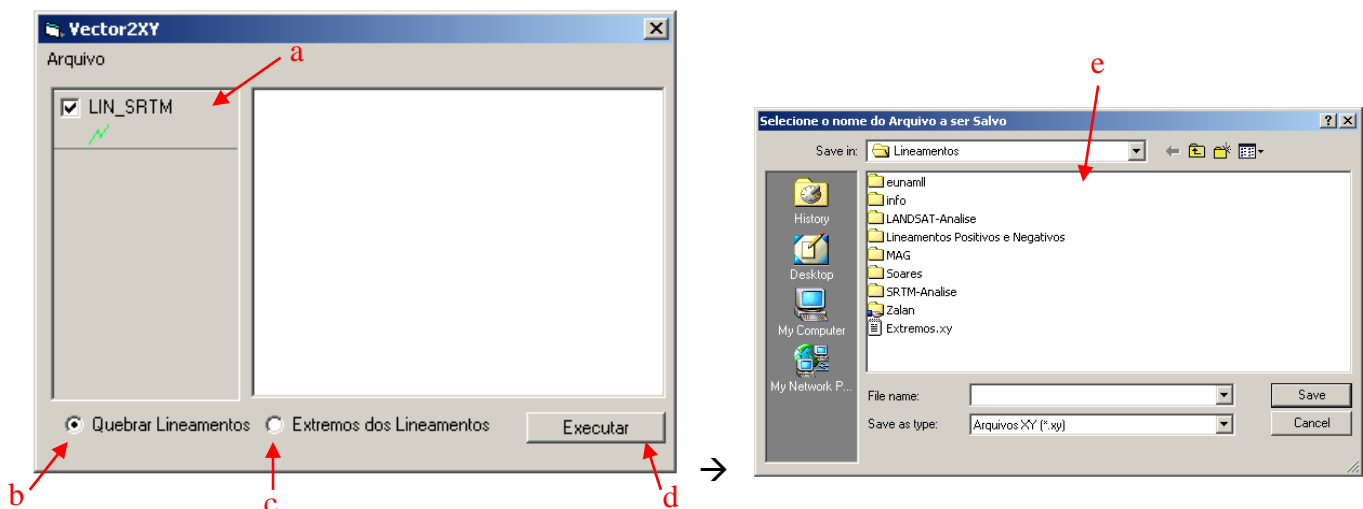


Figura 1 – Aspecto do aplicativo Vector2XY

4. Então pode-se executar a extração dos extremos clicando no botão **Executar** (Figura 1 - d). Ao clicar este botão uma janela, pedindo a indicação do nome do arquivo que será salvo, se abrirá (Figura 1 - e). Além do arquivo ASCII criado, a janela ao lado do frame

com o nome dos arquivos abertos conterá as coordenadas dos extremos dos lineamentos, separadas por vírgulas.

Após estes procedimentos o arquivo criado deverá ser convertido para o formato Dbase (DBF). Isto pode ser feito com alguma planilha eletrônica (e.g. Open Office Calc ou Microsoft Excel).

Em posse das coordenadas dos extremos dos lineamentos em formato DBF, pode-se iniciar o uso do aplicativo LinAnalyst.

2) Após iniciado o aplicativo, deve-se selecionar o arquivo DBF a partir dos menus do *frame* **Seleção do Banco de Dados** (Figura 2 - a). Os dados podem então ser visualizados a partir de uma planilha (**Visualizar** – Figura 2 - b). Para inserir os dados no programa pode-se dar duplo clique no nome do arquivo ou então marcar o arquivo e clicar o botão **Conectar** (Figura 2 - c). Obs: Os nomes dos arquivos devem conter até no máximo 8 caracteres.

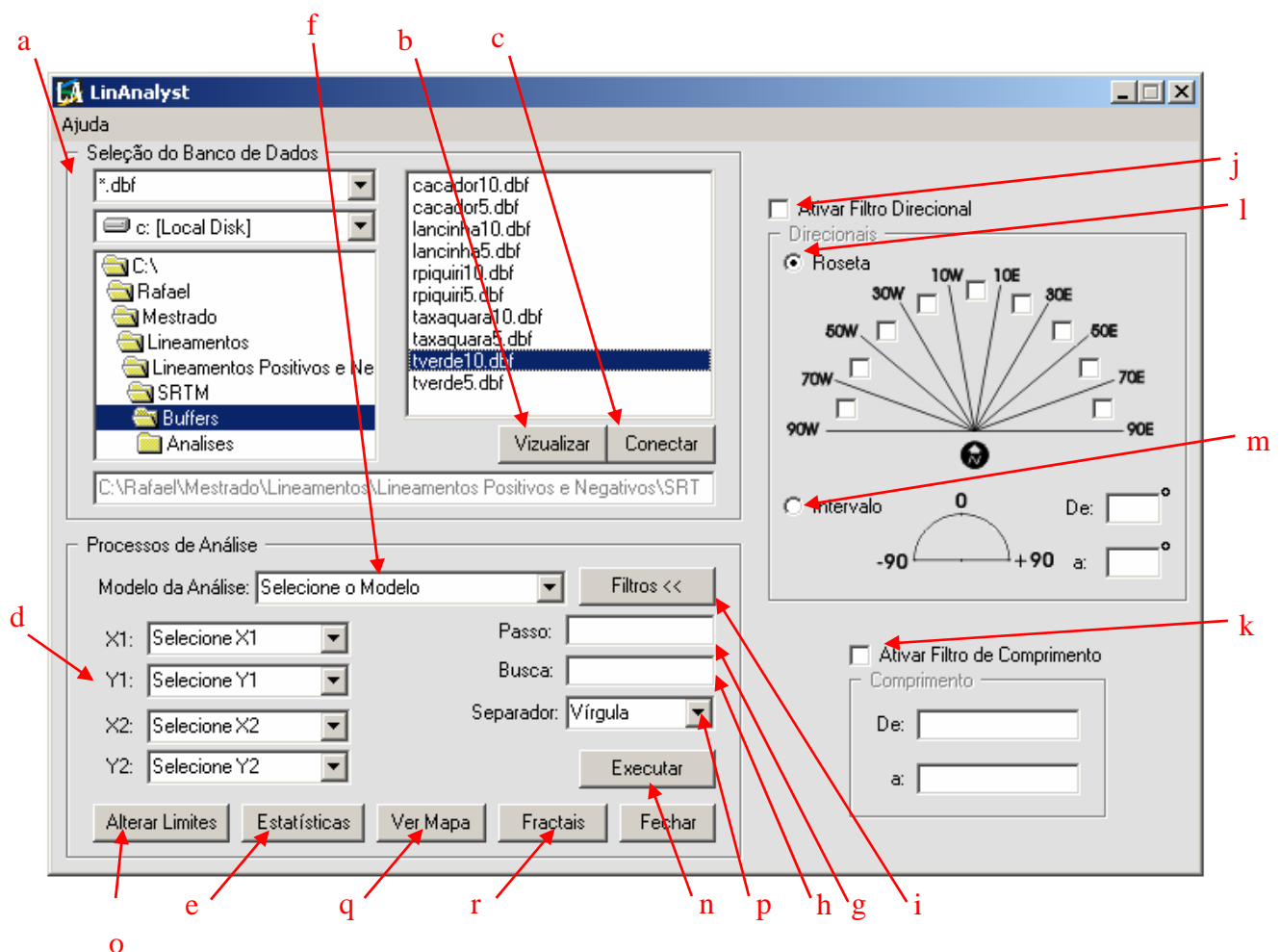


Figura 2 – Painel principal do LinAnalyst

Após a abertura do arquivo DBF, deve-se indicar os extremos X1, Y1, X2 e Y2 (Figura 2 - d).

Com os extremos indicados, pode-se obter as estatísticas gerais para os lineamentos através do botão **Estatísticas** (Figura 2 - e). Após clicar este botão uma janela com dados relacionados ao conjunto de lineamentos será aberta (Figura 3). Estes dados podem ser salvos

em um arquivo ASCII através do botão **Salvar** (Figura 3 - a). Ainda a partir deste painel pode ser acionado o módulo de rosetas (Figura 4).

Neste painel podem ser indicados diversos aspectos quanto aos diagramas que serão elaborados. No frame superior (Figura 4 - a) podem ser selecionados nome para a figura, Indicação com estatísticas gerais, porcentagens, número de pétalas e se os diagramas serão semi-círculos ou círculos (360°). Ainda podem ser escolhidas cores para as pétalas e para o círculo.

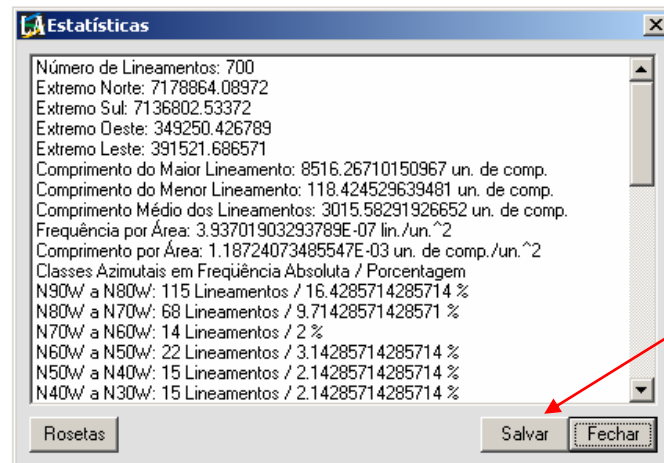


Figura 3 – Painel de estatísticas

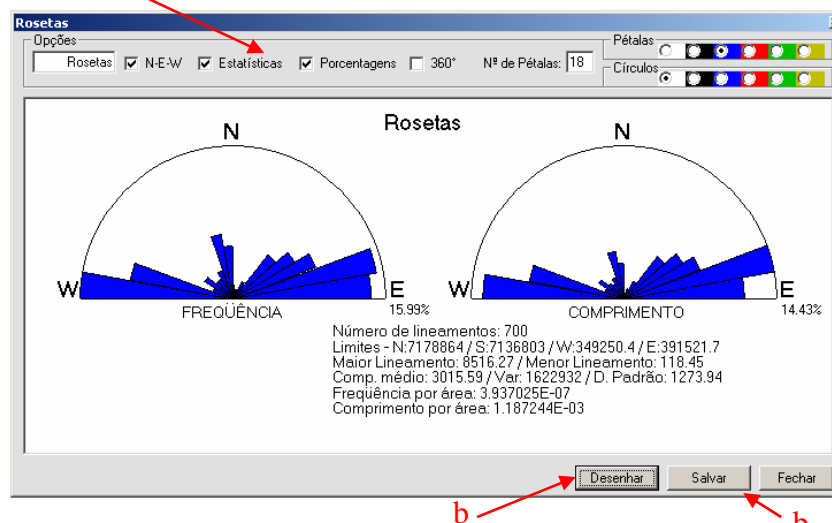


Figura 4 – Painel dos diagramas de rosetas

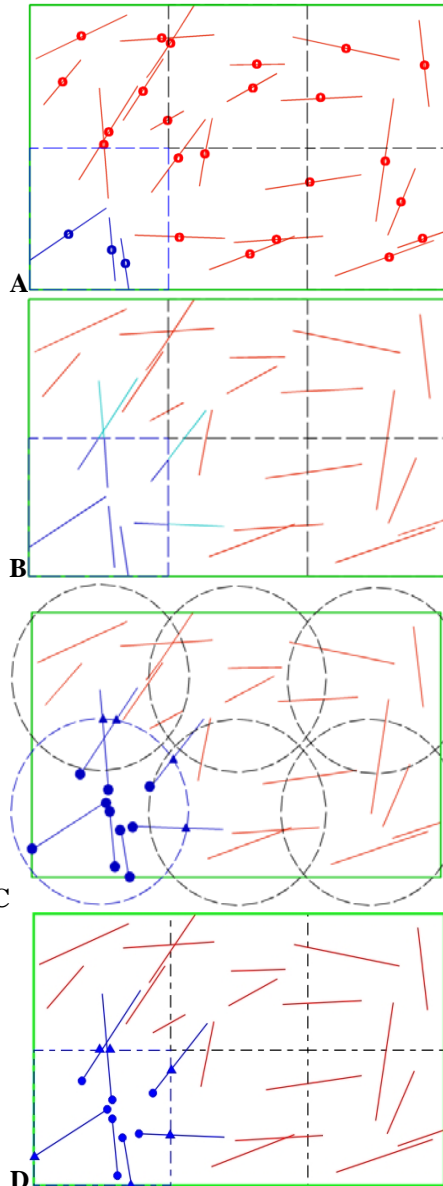
Para gerar os diagramas deve-se clicar no botão **Desenhar** (Figura 4 - a). Para salvar a figura criada (formato BMP) deve-se usar o botão **Salvar** (Figura 4 - b).

Novamente no painel geral (Figura 2), podemos executar as análises de contagem. Os métodos de análises disponíveis são 4 e encontram-se descritos na figura 5. Para maiores detalhes sobre estes métodos, consulte a dissertação de mestrado no qual foi desenvolvido o aplicativo. Além dos métodos indicados na figura, pode-se computar a quantidade de interseção de lineamentos em cada célula de análise.

Para selecionar o método de análise desejado deve-se utilizar a caixa de seleção (Figura 2 - f). Após selecionar o método, deve-se indicar o passo da análise (Figura 2 - g), que é relativo ao tamanho das células que serão computadas. No método de análise LBC (Linhas de Busca

Circulares), além do passo, deve-se indicar o tamanho do raio de busca (Figura 2 - h) para os círculos de amostragem.

Após estes passos, o usuário pode optar utilizar filtragens direcionais e/ou de comprimento através do botão **Filtros** (Figura 2 - i). Ao acionar este botão, um painel expansível, à direita da janela será mostrado. Para acionar a(s) filtragem(s) deve-se marcar o(s) botão(ões) **Ativar Filtro Direcional** (Figura 2 - j) e/ou **Ativar Filtro de Comprimento** (Figura 2 - k). Para as filtragens direcionais, pode-se optar pelo filtro na forma roseta (Figura 2 - l), onde selecionam-se classes específicas a serem analisadas, ou a filtragem por intervalo definido pelo usuário (Figura 2 - m). Para as filtragens por comprimento o usuário define o intervalo que será analisado. Os filtros direcionais e de comprimento podem ser usados simultaneamente.



A- No método dos centróides, para cada célula analisada são identificados os centróides presentes. A partir destes são computados frequência e comprimento acumulado destes lineamentos. Pode-se observar para a célula indicada em azul a presença de 3 centróides, portanto a frequência para esta célula é 3 e o comprimento acumulado é referente à soma do comprimento total destes mesmos três lineamentos.

B- No método indicado (grade) a contagem é executada a partir da presença do lineamento. Independente da parte inserida na célula analisada a presença acrescenta uma unidade à frequência de lineamentos. Além da frequência, neste método também são computados comprimento parcial e total dos lineamentos que interceptam a célula.

C- Neste método, conhecido como linhas de busca circulares, além do espaçamento da grade, o usuário indica o raio da linha de busca. O programa então detecta interseções dos lineamentos com o círculo de busca (parâmetro n, indicado por triângulos) e terminações dos lineamentos que estejam inseridos no círculo de busca (parâmetro m, indicado por círculos). A partir destes dois valores são então calculados, através das equações anteriormente indicadas, intensidade, comprimento e densidade de lineamentos.

D- Variação do método anterior. Os pontos de interseção e internos são computados a partir de uma grade regular quadrada. Com estes valores são então calculados os atributos intensidade, comprimento e densidade de lineamentos. As fórmulas para cálculo dos atributos foram adaptadas com relação à área das células de busca.

Figura 5 – Alguns métodos de análise de contagem implementados.

Após estas etapas indicadas, seleciona-se o tipo de separador (vírgula, espaço ou tabulação) que será usado no arquivo de saída (Figura 2 - p). Outra possibilidade é a alteração dos limites da análise. Em uma análise onde não sejam alterados os limites, são detectados os extremos leste, oeste, norte e sul, automaticamente, e usados como limites de análise. Caso deseje-se

alterar os limites da análise deve clicar sobre o botão **Alterar Limites** (Figura 2 - o). São indicados, então, em uma janela que se abre os limites padrões (extremos) e há quatro caixas de texto para indicação dos novos limites que serão usados (Figura 6).

Limites dos Dados:

Norte: 7178864
 Oeste: 349250.4 Leste: 391521.7
 Sul: 7136803

Alterar Limites:

Norte:
 Oeste: Leste:
 Sul:

Cancela OK

Figura 6 – Janela para alteração dos limites de análise

Depois das configurações indicadas a análise pode ser feita através do botão **Executar** (Figura 2 - n). Após o término da execução será aberta uma janela para indicação do nome arquivo que será salvo. O arquivo de saída é no formato ASCII (extensão XYA), e contém as coordenadas X e Y centrais das células analisadas, além dos parâmetros calculados, conforme o tipo de análise executado (Figura 7). Pode-se também optar por salvar um arquivo (extensão SOBRE) com os parâmetros usados na análise (Figura 8).

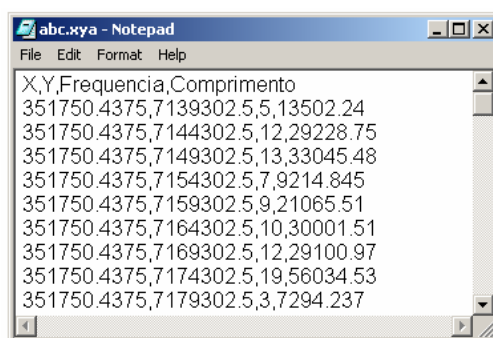


Figura 7 – Aspecto do arquivo ASCII gerado.

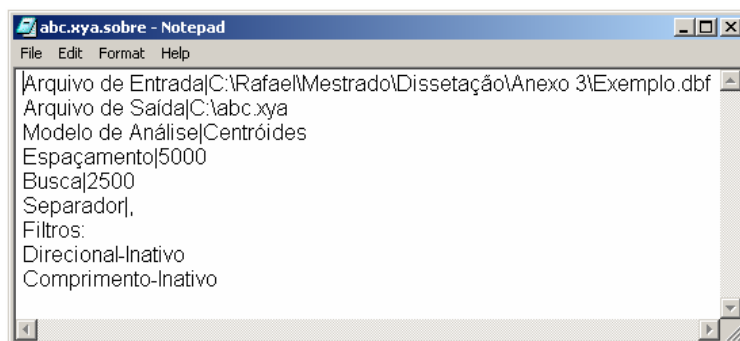


Figura 8 – Aspecto do arquivo com as especificações da análise.

Outras possibilidades do programa LinAnalyst são relacionadas a visualização e geração de mapas. Este módulo é acionado através do botão **Ver Mapa** (Figura 2 - q).

Neste módulo (Figura 9) as opções de visualização e geração de mapas são acessadas através de **Opções → Opções de Mapa**. Para visualização podem ser inseridos os lineamentos (Figura 10 - a). Podem ser classificados conforme classes de comprimento ou angular. Note que para esta classificação os lineamentos apresentam cores distintas para cada classe. Podem ser agrupados em 2, 4 ou 8 classes, tanto para a classificação angular como de comprimento. O aspecto de uma classificação angular para 4 direções está na figura 11.

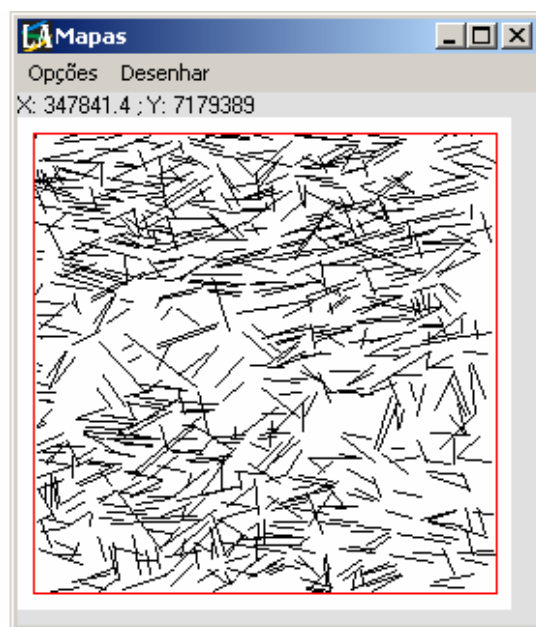


Figura 9 – Visualização de mapas

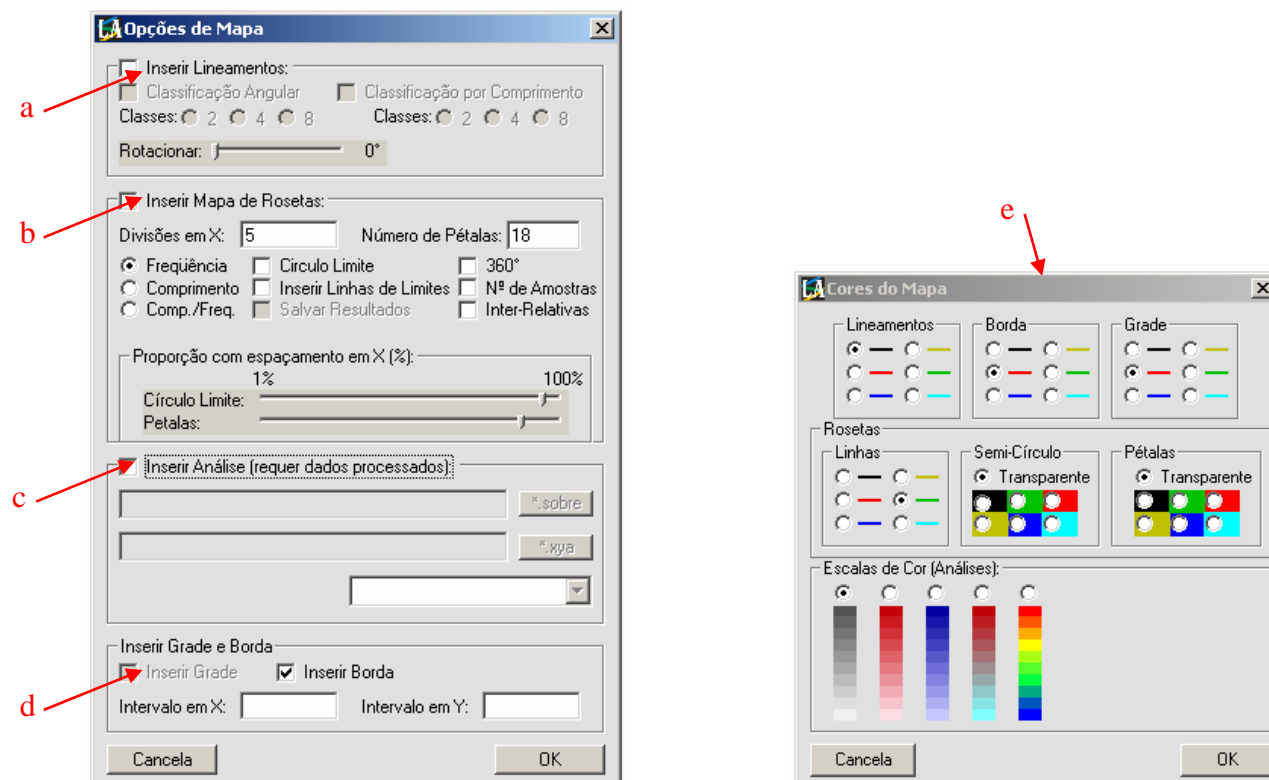


Figura 10 – Opções de Mapa e de Cor

Na opção inserir mapa de rosetas (Figura 10- b), pode-se escolher o número de células em que o mapa será analisado (Divisões em X), número de pétalas, tipo de diagrama (Frequência; Comprimento; ou Comprimento/Frequência), inserir o círculo limite do diagrama, inserir limites das células analisadas, escolher se o diagrama será semi-circular ou círculo completo (360°), inserir número de amostras, e se as rosetas terão tamanhos proporcionais nas diferentes células (Inter-Relativas). Pode-se também indicar a proporção de o círculo e as pétalas terão com relação às células de análise (Proporção do espaçamento em X. O aspecto de um mapa de rosetas pode ser observado na figura 12.

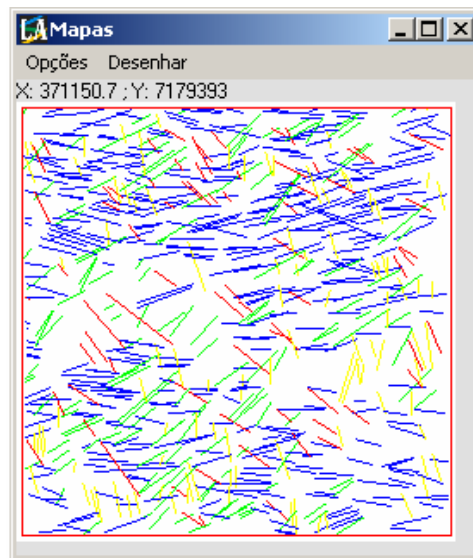


Figura 11 – Aspecto de uma classificação angular.
(Azul – E-W; Amarelo – N-S; Vermelho – NW; Verde – NE)

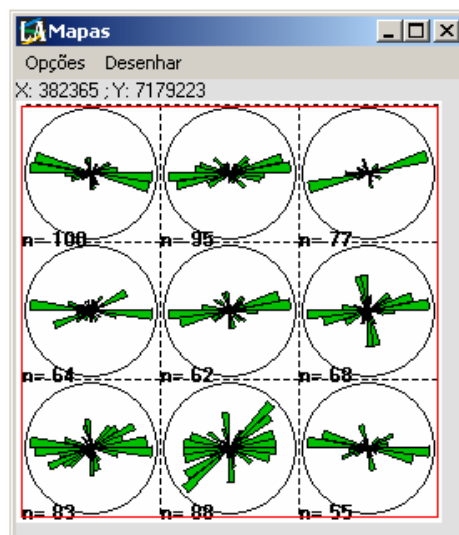


Figura 12 – Aspecto de um mapa de rosetas gerado.

A figura 10- c indica o campo referente à visualização de análises de contagem executadas. O arquivo com as especificações da análise deve ter sido salvo para visualização desta análise. A partir da indicação deste arquivo (botão ***.sobre**) previamente processado, o arquivo de extensão XYA será localizado (o local onde foi salvo não deve ter sido mudado!). Após estas etapas seleciona-se o atributo que será visualizado na caixa de seleção logo abaixo. Um

arquivo processado pode ser visualizado na figura 13. Note que esta visualização é bastante precária. A geração de um mapa de contorno, em um aplicativo distinto (e.g. Spring, Surfer, ArcMap), é indicado para uma visualização mais detalhada.

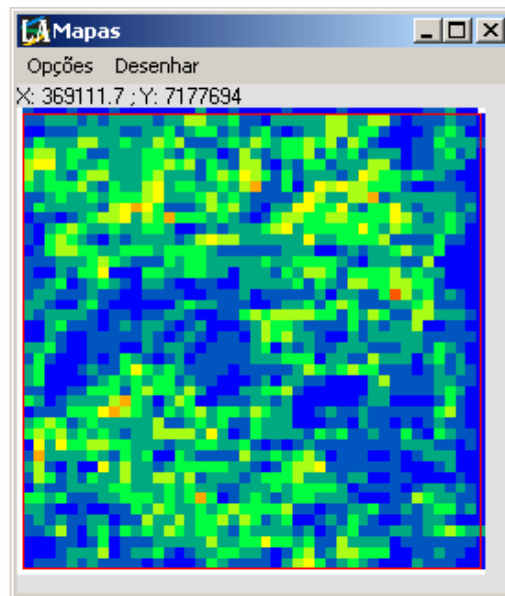


Figura 13 – Aspecto da visualização de um mapa de contagem
(Método grade, atributo frequência).

Podem também ser inseridas grades regulares, bem como a borda da área analisada (Figura 10- d). Na figura 10 - e estão indicadas as possibilidades de cores para os mapas criados.

Após a indicação das opções de mapa e cor desejadas, para desenhar o mapa o usuário deve clicar em **Desenhar → Zoom Tudo**.

O mapa gerado pode ser salvo em formato BMP através de **Opções → Salvar Imagem**. Através deste comando será mostrada uma nova janela (Figura 14). Nesta janela o usuário pode optar por salvar o mapa no tamanho em que se encontra (Figura 14 - a), ou alterar este tamanho (Figura 14 - b) indicando as novas dimensões em *pixels* (Figura 14 - c). Após a seleção dos parâmetros deve-se clicar no botão **Salvar** (Figura 14- d).



Figura 14 – Janela com opções para salvar mapa

Através do botão **Fractais** (Figura 2 - r), no painel principal, é acionado o módulo de **Análise Fractal** (Figura 15).

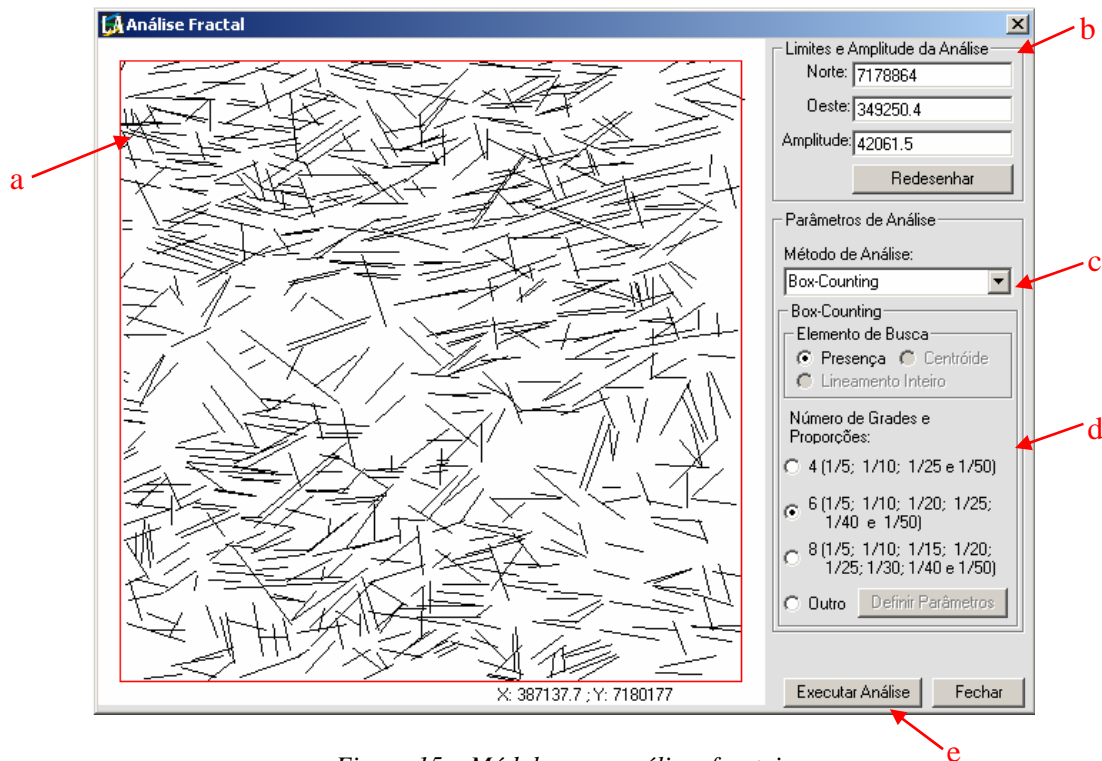


Figura 15 – Módulo para análises fractais

Quando acionado o painel de Análise Fractal todo o conjunto de lineamentos será mostrado, e um quadrado de cor vermelha, indicando os limites da análise será também mostrado (Figura 15 - a). Os limites e a amplitude deste quadrado são também mostrados (Figura 15 - b), e podem ser alterados conforme queira o usuário. Para alterar o limite de análise deve-se indicar os limites **Norte** e **Oeste**, a **Amplitude**, e posteriormente clicar no botão **Redesenhar**. No painel indicado (figura 15 – a) será, então, mostrado o novo limite de análise através do quadrado vermelho.

Para seleção do método de análise que será utilizado deve-se fazer a indicação na caixa de seleção (Figura 15 – c). Podem ser selecionados três métodos distintos (*Box-Counting*; Direcional; e Comprimento). Os métodos são comentados na dissertação de mestrado. Conforme seja alterado o método de análise, o painel logo abaixo (Figura 15 - d) será também mudado. Neste painel, então, serão indicados os parâmetros usados nas análises.

Para a análise *Box-Counting*, o usuário pode definir a quantidade de grades que serão usadas, e suas proporções relacionadas à área inicial (Figura 15 - b) de análise indicada. Há três seleções já prontas, ou o usuário pode definir novos parâmetros clicando na opção **Outro**, depois no botão **Definir Parâmetros**. Caso este botão seja clicado, será mostrada uma janela com onde devem ser indicados o número de grades (Figura 16 - a) e suas proporções com relação à área original de análise (Figura 16 - b).

Após a seleção dos parâmetros, a análise é executada através do botão **Executar Análise** (Figura 15 - e). Depois de executada a análise, será mostrada uma janela para visualização dos resultados (Figura 17). Clicando no botão **Pontos** (Figura 17 - a) serão plotados os pontos

referentes a cada grade em um diagrama Log-Log. Através do botão **Ajustar Reta** (Figura 17 - b), uma reta será, através do método dos mínimos quadrados, ajustada aos pontos anteriormente plotados. Os parâmetros do coeficiente angular desta reta (D - Dimensão Fractal) e do coeficiente de correlação (r) também são indicados no gráfico. O gráfico pode ser salvo em formato BMP a partir do botão **Salvar** (Figura 17 - c).

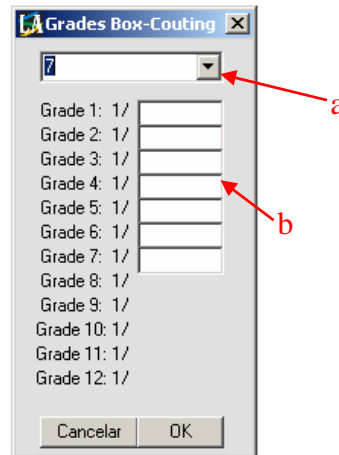


Figura 16 – Módulo para análises fractais

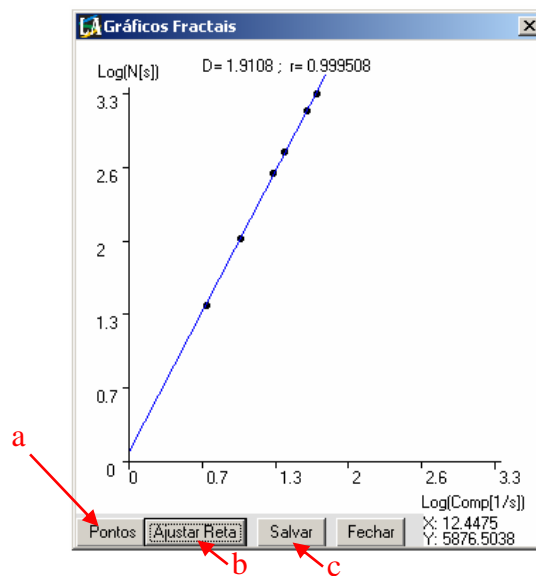


Figura 17 – Visualização dos resultados da análise Box-Counting

Quando selecionado o método de análise **Direcional** (Figura 15 - c), o usuário tem a possibilidade de escolher a quantidade de linhas de busca, para cada uma das 18 direções analisadas - caixa de texto **Linhas de Busca (horizontal)**. O outro parâmetro que o usuário pode selecionar é o número de classes utilizadas no cálculo da dimensão fractal para cada direção analisada (caixa de texto **Número de Classes**). Após a execução da análise será mostrada uma janela com gráficos indicando os resultados (Figura 18). Os três gráficos gerados podem ser visualizados a partir da mudança na caixa de seleção (Figura 18 - a). O gráfico **Comprimento Médio** apresenta a média dos fragmentos computados entre os linemantos para a direção indicada no gráfico, de 10° em 10°. Os gráficos **Fractais-Comprimento** e **Fractais-Frequência** indicam a dimensão fractal, ajustada a partir dos segmentos intactos (distâncias entre lineamentos) para cada classe direcional.

Através do botão **Salvar** (Figura 18 - b) o gráfico ativo será gravado em formato BMP.

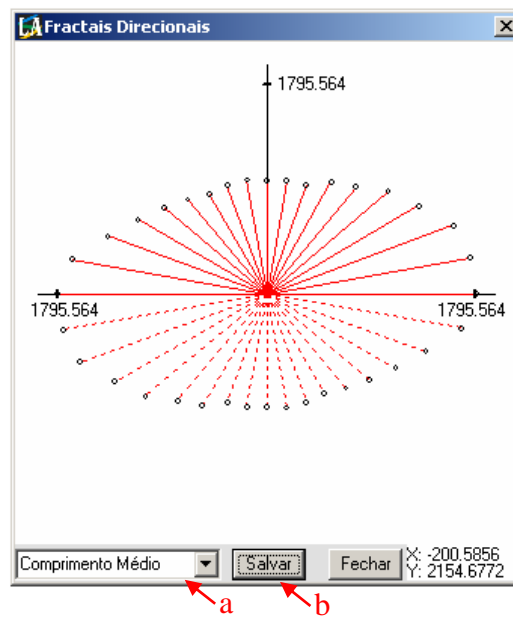


Figura 18 – Visualização dos resultados da análise Direcional

O método de análise **Comprimento** (Figura 15 - c) calcula a dimensão fractal a partir dos comprimentos de todo conjunto de lineamentos. Para esta análise o usuário pode indicar os parâmetros **Número de Intervalos** (número de classes em que serão classificados os comprimentos dos lineamentos para cálculo da dimensão fractal) e qual o tipo da análise (se **Comprimento/Frequência**; **Frequência**; ou **Comprimento**). Para cada uma destas análises o usuário pode ainda selecionar se os gráficos serão elaborados com valores acumulados ou não. Após a seleção dos parâmetros e execução da análise, será mostrada uma figura semelhante àquela do método *Box-Counting*, onde deverá selecionar a indicação dos pontos computados e posteriormente ajustar uma reta a eles.

Sigmas v. 1.0.0

MANUAL DO APLICATIVO

Cálculo e visualização de paleotensões utilizando o critério de Mohr-Coulomb.

Programa desenvolvido durante a dissertação de mestrado intitulada:

Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná.

Rafael Correia de Freitas

*Qualquer dúvida, favor entrar em contato com:

rcdfreitas@click21.com.br

Para maiores detalhes referentes aos métodos utilizados na implementação do aplicativo, bem como sobre o critério de Mohr-Coulomb, veja a dissertação de mestrado.

1) Dados de entrada:

Os dados de entrada para cálculo de σ_1 , σ_2 e σ_3 são referentes à atitude do plano de falha, bem como da estria, em formato Clar, e da direção de movimentação da falha. Estes dados podem ser inseridos individualmente ou a partir de planilhas em formato ASCII.

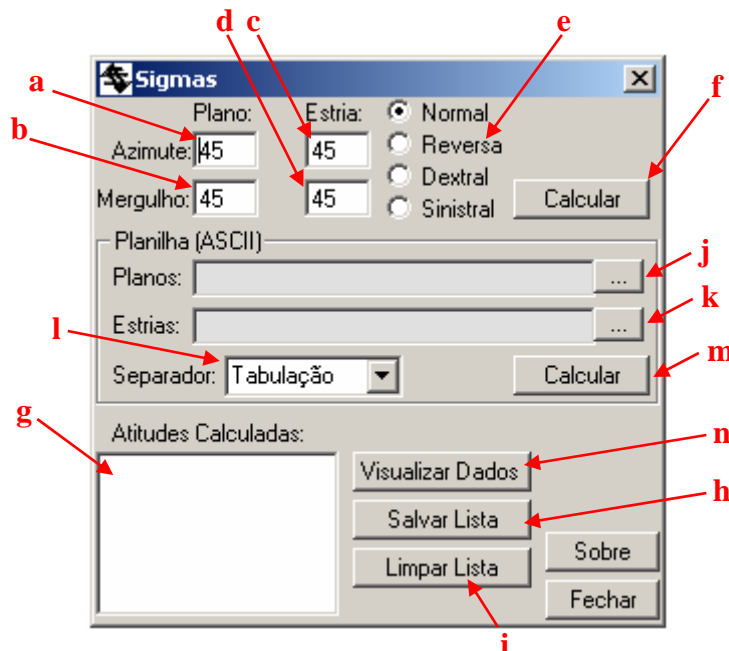


Figura 1 – Painel de entrada de dados

- Entrada manual de dados:

Para a inserção individual de atitudes e cinemática devem ser indicados azimuth (Figura 1 - a) e mergulho (Figura 1 - b) do plano de falha, azimuth (Figura 1 - c) e mergulho (Figura 1 - d) da estria e cinemática (Figura 1 - e) envolvida.

Após a indicação dos parâmetros as atitudes de σ_1 , σ_2 e σ_3 podem ser calculadas a partir do botão **Calcular** (Figura 1 - f). Após o processamento, as atitudes calculadas para σ_1 , σ_2 e σ_3 serão indicadas no painel **Atitudes Calculadas** (Figura 1 - g). Estas atitudes podem ser salvas em arquivos ASCII através do botão **Salvar Lista** (Figura 1 - h). Os arquivos ASCII de saída são três: tensões máximas (σ_1), intermediárias (σ_2) e mínimas (σ_3), salvos, respectivamente, nesta ordem.

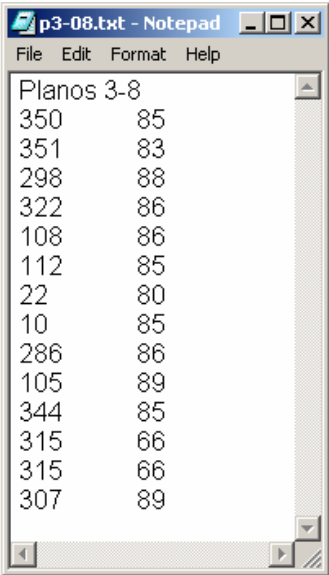
Através do botão **Limpar Lista** (Figura 1 - i) as atitudes são excluídas do painel **Atitudes Calculadas**.

- Entrada de dados através de planilhas:

Os dados de entrada devem estar separados em duas planilhas diferentes. A primeira delas, referente aos planos de falhas, deve ser indicada a partir do botão ao lado da caixa de texto **Planos** (Figura 1 - j). Esta planilha deve conter na primeira coluna o azimuth de máximo mergulho dos planos e na segunda seu mergulho (Figura 2 - a). A segunda planilha, referente às estrias, deve ser indicada a partir do botão ao lado da caixa de texto **Estrias** (Figura 1 - k). Esta planilha deve conter na primeira coluna o azimuth da estria, na segunda seu mergulho, e ainda uma terceira coluna com a indicação cinemática (Figura 2 - b). A indicação cinemática é feita da seguinte forma:

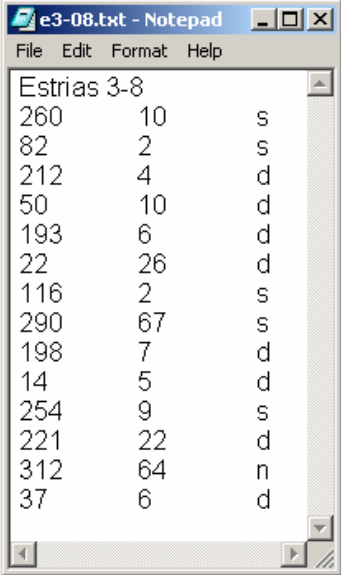
Sinistral: “s” Dextral: “d” Normal: “n” Reversa: “r”

a



Planos 3-8	
350	85
351	83
298	88
322	86
108	86
112	85
22	80
10	85
286	86
105	89
344	85
315	66
315	66
307	89

b



Estrias 3-8		
260	10	s
82	2	s
212	4	d
50	10	d
193	6	d
22	26	d
116	2	s
290	67	s
198	7	d
14	5	d
254	9	s
221	22	d
312	64	n
37	6	d

Figura 2 – Aspecto das planilhas para entrada de dados

Após a indicação das planilhas, deve-se selecionar o tipo de **Separador** usado (Figura 1 - l) e, então, as tensões podem ser computadas clicando-se sobre o botão **Calcular** (Figura 1 - m). Após o processamento, as atitudes calculadas para σ_1 , σ_2 e σ_3 serão indicadas no painel **Atitudes Calculadas** (Figura 1 - g). As atitudes podem ser salvas como indicado na entrada manual de dados.

1) Visualização dos dados:

Após o cálculo das atitudes para as tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 , pode-se observar as paleotensões clicando-se no botão **Visualizar Dados** (Figura 1 - n). Será então aberta uma janela (Figura 3), com um estereograma, onde as atitudes serão plotadas.

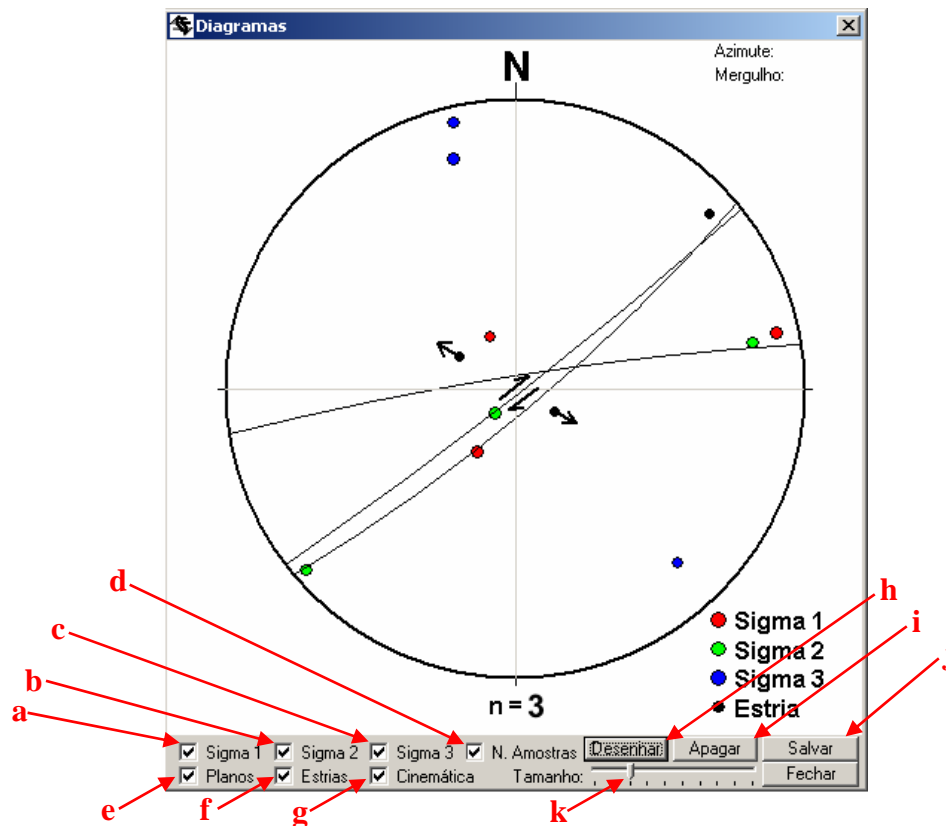


Figura 3 – Visualização dos dados calculados

No diagrama o usuário pode selecionar a indicação de diversos elementos:

- σ_1 (Figura 3 - a);
- σ_2 (Figura 3 - b);
- σ_3 (Figura 3 - a);
- Número de Amostras (Figura 3 - d);
- Planos de Falha (Figura 3 - e);
- Estrias (Figura 3 - f) e
- Indicação cinemática (Figura 3 - g).

Após a seleção dos elementos que irão estar presentes, o diagrama é criado através do botão **Desenhar** (Figura 3 - h). Serão indicados no diagrama os elementos referentes às atitudes que estiverem contidas na caixa de texto **Atitudes Calculadas** (Figura 1 - g). Através do botão **Apagar** (Figura 3 - i) o diagrama é excluído, e clicando-se sobre o botão **Salvar** (Figura 3 - j) o diagrama será convertido para uma figura BMP. Com a barra de seleção **Tamanho** (Figura 3 - k) os pontos referentes às paleotensões e estrias são aumentados ou diminuídos, conforme movimentação à direita ou à esquerda, respectivamente.